

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE COMPOSTELA



**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGROFORESTAL**

**INFLUENCIA DE LA PODA EN EL
DESARROLLO DE MASAS DE *Pinus radiata*
D. Don Y *Pinus pinaster* Aiton EN ASTURIAS**

TESIS DOCTORAL

ANDREA HEVIA CABAL

Lugo, 2012

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE COMPOSTELA



ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGROFORESTAL

**INFLUENCIA DE LA PODA EN EL
DESARROLLO DE MASAS DE *Pinus radiata*
D. Don Y *Pinus pinaster* Aiton EN ASTURIAS**

TESIS DOCTORAL

Autora: Dña. Andrea Hevia Cabal

Director: Dr. D. Juan Gabriel Álvarez González

Codirector: Dr. D. Juan Pedro Majada Guijo

Lugo, 2012

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE COMPOSTELA



ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGROFORESTAL

**INFLUENCIA DE LA PODA EN EL
DESARROLLO DE MASAS DE *Pinus radiata*
D. Don Y *Pinus pinaster* Aiton EN ASTURIAS**

ANDREA HEVIA CABAL

INGENIERA DE MONTES

Memoria para optar al grado de Doctora, realizada bajo la dirección del **Dr. D. Juan Gabriel Álvarez González**, Catedrático de Universidad del Departamento de Ingeniería Agroforestal de la Universidad de Santiago de Compostela, y la codirección del **Dr. D. Juan Pedro Majada Guijo**, Director Científico del Centro Tecnológico Forestal y de la Madera de Asturias (CETEMAS).

VºBº

El director de la tesis

VºBº

El codirector de la tesis

Dr. D. Juan Gabriel Álvarez González

Dr. D. Juan Pedro Majada Guijo

La doctoranda

Dña. Andrea Hevia Cabal

Lugo, 2012

El **Dr. D. Juan Gabriel Álvarez González**, Catedrático de Universidad del Departamento de Ingeniería Agroforestal de la Universidad de Santiago de Compostela, y el **Dr. D. Juan Pedro Majada Guijo**, Director científico del Centro Tecnológico Forestal y de la Madera de Asturias (CETEMAS), informan:

Que la memoria titulada **“Influencia de la poda en el desarrollo de masas de *Pinus radiata* D. Don y *Pinus pinaster* Aiton en Asturias”**, presentada por la Ingeniera de Montes **Dña. Andrea Hevia Cabal** para optar al grado de Doctora Ingeniera de Montes, fue realizada bajo nuestra dirección. Considerando que el trabajo está finalizado, y es materia de tesis, autorizamos su presentación.

VºBº

El director de la tesis

VºBº

El codirector de la tesis

Dr. D. Juan Gabriel Álvarez González
Lugo, 2012

Dr. D. Juan Pedro Majada Guijo
Lugo, 2012

La doctoranda

Dña. Andrea Hevia Cabal
Lugo, 2012

Para la realización de la presente tesis doctoral, la doctoranda ha contado con una beca predoctoral del Programa de Formación de Profesorado Universitario (FPU-MEC, AP2006-03890) del Ministerio de Educación y Ciencia (BOE 109, 07/05/2007), bajo la supervisión del Dr. D. Juan Gabriel Álvarez González, Catedrático de Universidad del Departamento de Ingeniería Agroforestal de la Universidad de Santiago de Compostela, dentro del Grupo de Investigación *Unidade de Xestión Forestal Sostible* (www.usc.es/uxfs), y del Dr. D. Juan Pedro Majada Guijo, Director del CETEMAS y Coordinador del Programa Forestal de Investigación del Servicio Regional de Investigación y Desarrollo Agroalimentario del Principado de Asturias (SERIDA).

AGRADECIMIENTOS

Quisiera dar gracias a todas aquellas personas que me han ayudado durante esta etapa de tesis, siendo consciente de lo difícil que resulta poder considerar a todas y cada una de ellas. Por ello, pido perdón de antemano a quienes no hayan sido mencionados en este texto.

En primer lugar, y de forma realmente especial, quisiera dar las gracias a mi director de tesis, el Dr. Juan Gabriel Álvarez, y mi codirector, el Dr. Juan Pedro Majada, por haber aceptado la supervisión de este trabajo y haberme hecho sentir la estudiante de doctorado más afortunada. De forma más detallada, debo agradecer al Dr. Juan Gabriel Álvarez el haber estado siempre ahí, pendiente de que la tesis fuera adelante, animándome en el trabajo y aportándome en todo momento su confianza, con oportunos y sabios consejos, y una magnífica orientación durante todo este tiempo ¡Gracias por todo lo que me has enseñado! Al Dr. Juan Pedro Majada le estoy ampliamente agradecida por haberme transmitido, desde el fin de mi carrera como Ingeniera Técnica Forestal, un apoyo constante a mi trabajo, ofreciéndome la oportunidad de seguir haciendo lo que tanto me gusta, investigando y aprendiendo cada día más. Gracias a los dos por todo el esfuerzo realizado, por aportar mejoras constantes al trabajo, y por todas esas horas extras que habéis tenido que hacer para poder presentar finalmente esta memoria. Ha sido un gran honor haber sido vuestra alumna de doctorado durante estos años.

Debo agradecer además al Dr. Roque Julio Rodríguez, así como nuevamente al Dr. Juan Gabriel Álvarez, su apoyo para que esta línea de trabajo fuera adelante. Ambos habéis sido indispensables para el inicio y continuación de la misma.

No debo olvidarme de las instituciones que también han colaborado en esta línea de investigación: Servicio de Ordenación Forestal de la Consejería de Agroganadería y Recursos Autóctonos del Principado de Asturias, Instituto de Desarrollo Rural (IDR), Servicio Regional de Investigación y Desarrollo Agroalimentario del Principado de Asturias (SERIDA) y Centro Tecnológico Forestal y de la Madera de Asturias (CETEMAS).

Asimismo, ha sido fundamental la ayuda del personal del Servicio de Ordenación Forestal de la Consejería de Agroganadería y Recursos Autóctonos del Principado de Asturias, muy especialmente los técnicos de las comarcas forestales en las que han sido instaladas las parcelas de ensayo empleadas en este trabajo. Gracias además al personal de bomberos por facilitar algunos de los datos necesarios para la parte introductoria de la presente memoria.

No quiero dejar pasar la oportunidad de agradecer a las personas que trabajan en el SERIDA/CETEMAS y en el SERPA los buenos momentos compartidos día a día,

destacando, entre otros, a: Chus, Eloy, Lolo, Lucía, Fran Fuente y los Drs. Ángelo Kidelman, Isabel Feito, Marta Ciordia, Tania Velasco y Unai Ortega. Además, no debo olvidarme de mis nuevas compañeras de despacho: María, Marta y Sandra, o de personas como Alba, Fran, Gely, Isabel Parrado, Silvia o Sole, que tantas veces me han preguntado y animado con la tesis. Gracias también a los Drs. Andrés Dieste, Elena Canga y Vanessa Baño, así como a mi colega Miguel García por facilitarme información para alguna de las partes de este trabajo, debiendo destacar a este último por toda la ayuda y amistad mostrada desde el comienzo de esta andadura... Además, debo agradecer el apoyo de todos los que me han ayudado en las mediciones de campo, entre los que se encuentran: Abel, Antonio, Enrique, Ernesto, Inés, Joaquín, Juan Carlos y Zapico. También debo resaltar la ayuda incansable de Laura, Manu y Paula, con una impecable manera de trabajar, a pesar de las largas jornadas dedicadas a ello. Paula, Laura, ya sabéis que os estoy infinitamente agradecida, habéis sido indispensables en este trabajo y en esta etapa de tesis, muchas gracias por vuestra ayuda constante, pero sobre todo por vuestra amistad. En realidad, debo decir que en este tiempo habéis sido muchos los que además de compañeros habéis sido amigos. Gracias además a Ronnie, por su ayuda con el inglés. Por último, he de agradecer a investigadores de referencia, colaboradores del SERIDA/CETEMAS, como el Dr. Ricardo Alía o la Dra. Maria João Magalhães, su interés por el desarrollo de esta tesis.

Debo destacar también a las personas que trabajan en la UXFS (EPS de Lugo) que, de alguna manera, me han ayudado en diversas partes de este trabajo, destacando a: la Dra. Ana Daría Ruiz, por su orientación en la temática de incendios, la Dra. Fina Lombardero, por sus comentarios en la parte de sanidad forestal y el Dr. Manuel Antonio Rodríguez, por su ayuda en la caracterización climatológica de las zonas de estudio. Gracias también a los Drs. César Pérez, Esteban Gómez, Felipe Crecente, Guillermo Riesco y Ulises Diéguez, por sus oportunos comentarios en determinados momentos del trabajo y su ofrecimiento para ayudar en lo que necesitara. También debo agradecer todo el apoyo mostrado por el Dr. Alberto Rojo (gracias por los buenos momentos durante el almuerzo) y el Dr. Manuel Guaita, con quien he podido compartir una parte importante de mi tiempo en Escocia, manteniendo posteriormente el contacto en la distancia, transmitiéndome constantemente su positividad, y enviando siempre un mensaje de ¡ÁNIMO!

Durante el tiempo de trabajo en Lugo ha sido fantástica la calidad profesional y humana mostrada por las personas del laboratorio de Dasometría. También ha sido una gran oportunidad recibir visitas de investigadores punteros en el área de modelización forestal, como el Dr. Klaus von Gadow, quien resultó ser de gran ayuda para la realización del Trabajo de Investigación Tutelado presentado con anterioridad a esta tesis. Debo agradecer también la preocupación por el desarrollo de este trabajo por parte de los diferentes compañeros que han ido pasando por el

laboratorio de Dasometría, entre otros: Dori, Eva, Horacio, Iban, Luis, Sacramento y Samuel, debiendo destacar a Fernando (“compañero de carreras”), Ivonne, y Rosario por hacer que mis días allí fueran algo más que trabajo. También debo señalar al reciente Dr. Eduardo Ferreiro y nuevamente al Dr. César Pérez por su ayuda constante con las burocracias relacionadas con la tesis así como por su constante interés en el avance de la misma. Por último, y con especial cariño, debo agradecer a la Dra. Almudena Pérez, y a mi colega Lucía Rego su apoyo durante todo este tiempo, visitándome allá donde estuviera y pendientes siempre de cómo iba todo. Almudena, muchas GRACIAS por todo lo que has hecho como amiga y como compañera, por tus mensajes y consejos, y por tu incansable apoyo en lo que siempre he necesitado. Eres una persona única ¡Qué sería de nosotros sin ti!

También debo mencionar a los estudiantes de Ingeniería Técnica Forestal de la Universidad de Oviedo y de Ingeniería Superior de Montes de la EPS de Lugo, ahora ya ingenieros, que han participado en algunos de los inventarios realizados para la consecución de este trabajo, entre otros: Alejandra Crabiffosse, Alejandro Álvarez, Alejandro Vivas, Alex, Andrés, Cristina, David, María, Pelayo, etc. No debo olvidarme tampoco de las personas de la EPS de Lugo: Hector Ferreiro, Xosé Covelo, Quike y Felipe, por su colaboración en el inicio del trabajo de campo.

Debo considerar además la buena disposición de los Drs. Asunción Cámara, Marcos Barrio y Javier Gorgoso, profesores de la Escuela de Ingenierías Técnicas de Mieres, así como del Dr. Fernando Castedo, profesor de la Escuela Superior y Técnica de Ingeniería Agraria de la Universidad de León, del Dr. Mario Meneses, profesor de la Universidad Austral de Chile y de los Drs. Miguel Espinosa y Fernando Muñoz, de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Concepción de Chile. Todos habéis sido fundamentales en la obtención de diversos trabajos que he ido precisando durante la redacción de esta memoria.

I would like to thank the Forestry Commission for providing a Forest Research Stay of six month in Edinburgh, Scotland and FPU by funding it. First of all a warm thank you to Dr. Barry Gardiner and Elspeth Macdonald for the opportunity to learn more about timber quality models. Further thanks to people who helped me in different stages of my work at NRS, especially Dr. Dave Auty, easy to work with and very friendly. I also wish to thank the assistance by Edinburgh Napier University, particularly to Stefan Lehneke and James Ramsay. For the assistance at Glasgow University, I would like to thank Dr. Mike Jarvis, Dr. Leena Vihermaa and, especially, Steven Adams. Also, I would like to thank everyone who showed me their friendship during my stay in Scotland, particularly to Carlos, Célia, Greg, Luciane, Martina, Jonathan, Jordan, Tom, Vera and Vanessa. Jonathan, thank you for our walks during the work breaks and your help with my English. Vera and Luciane, thank you for ensuring that my time in Scotland was warmer, and I could

improve my Portuguese faster than my English - we had a very good time together! Vanessa, you got that I felt at home all the time, thank you!


À Professora Margarida Branco do Brito Tavares Tomé, por ter aceite o meu estágio no Instituto Superior de Agronomia (ISA) em Lisboa. Obrigada também à Paula Soares e ao Luis Fontes pela ajuda com o modelo 3-PG durante o meu trabalho no ISA. O tempo lá foi muito bom para mim, e agradeço a amizade e simpatia dos colegas do ISA: Marta Coelho, Jordi, e muito especialmente à Susana Miguel Barreiro, uma das melhores pessoas que eu conheço. Agradeço novamente o suporte financeiro da bolsa FPU que me permitiu realizar este estágio.

Mención especial para mi gente: Félix, Marigel y Silvia; mis grandes amigos asturianos y compañeros de carrera, destacando a Dani, Ivan, Javi y María; mis incansables amigas asturianas: Paula, Saray y Esme; mis amigos de aventuras por Lugo, particularmente Anita (gracias por el tiempo de convivencia, los paseos por la muralla y la amistad mostrada desde la distancia), Juan y Luci, Olaia y Raquel; los “astur-cántabros” Beti y Juan; y mis amigos de “dendro”: Ángela, Clara, las casi Dras. Raquel Alfaro y Virginia Garófano, y los Drs. Jaime Madrigal, Juan A. Ballesteros y Raúl Sánchez (“ya lo sabes...ni un segundo en el que no aprender...”). Gracias también al resto de amigos que no he nombrado pero que han estado ahí durante estos años. Todos habéis hecho que el esfuerzo de realizar esta tesis fuera más fácil. Gracias por ser como sois, por haberme sacado de mi “aislamiento” en muchas ocasiones y por haber entendido mis ausencias en todo este tiempo.

Por último, pero no menos importante, debo agradecer a mi gran familia, especialmente a mis padres, mi hermano y mis abuelos, y por supuesto a tí, Cristian, la comprensión que habéis mostrado durante estos años, el haberme apoyado para que continuara mi formación, vuestra paciente espera y vuestra confianza en que algún día esta tesis vería la luz. Habéis sido un pilar fundamental en todo este tiempo. De forma particular, debo pedir disculpas a mi hermano Jacobo por no haber podido compartir más momentos juntos durante estos años de tesis. Ahora que se acaba esta etapa, y que estás fuera, te voy a extrañar muchísimo ¡Prometo visitarte más a menudo! Cristian, gracias por haberme ayudado cuando lo he necesitado y por haber estado siempre ahí ¡Espero poder compensar todo el tiempo en que he estado ausente! Papá, no sabes cuanto agradezco ese granito de arena que has puesto en este trabajo. Es muy especial para mí pensar que parte de este esfuerzo ha sido compartido. Papá, mamá, infinitas ¡GRACIAS! No habría palabras ni días suficientes en esta vida para expresar todo mi agradecimiento hacia vosotros. Vuestra sencillez, entrega, cariño, protección y ayuda constante superan todos los límites ¡Gracias por hacerme tan feliz y ojalá algún día pueda parecerme a vosotros!

Gracias a tod@s

A mi familia



*Árbol,
te admiro desde que naces,
trato de comprender tu crecimiento y comportamiento,
me sorprende la manera en que muestras tus vivencias,
a través de tus formas y cicatrices.
Todo a tu alrededor es complejo
y solo estando a tu lado podría llegar a entenderlo.*

PREFACIO

La presente tesis doctoral se encuentra estructurada en 7 capítulos, que se resumen a continuación:

En el capítulo 1, *Introducción general*, se incluye un primer apartado en el que se justifica el estudio realizado en esta tesis y se recogen los objetivos planteados para ser alcanzados durante el desarrollo de la misma. Asimismo, se incluye un segundo apartado en el que se presentan algunos de los principales antecedentes que ayudan a entender más en detalle el marco en que se ha desarrollado este trabajo. Para ello, se recoge una breve descripción de los aspectos generales asociados a las especies estudiadas, *Pinus radiata* D. Don y *Pinus pinaster* Aiton, con especial atención al papel de ambas coníferas en la Comunidad Autónoma de Asturias, realizando una somera revisión de la distribución de cada especie en el territorio asturiano, su gestión selvícola, las condiciones bióticas y abióticas más determinantes para su desarrollo en dicha provincia y su aprovechamiento forestal. Posteriormente se describen algunos de los factores más destacables en relación con la madera de calidad y la gestión de podas para la obtención de ese tipo de producto, atendiendo también al efecto que estas intervenciones tienen sobre la persistencia de la masa.

En el capítulo 2, *Material y métodos*, se realiza una descripción general del dispositivo de parcelas estudiado en la presente tesis, definiendo de forma más específica el diseño experimental así como la metodología de toma de datos, procesado y análisis de los mismos.

En el capítulo 3, *Caracterización y evaluación de la poda en masas jóvenes regulares de Pinus radiata* D. Don y *Pinus pinaster* Aiton, se analizan los criterios de poda seleccionados inicialmente en el diseño experimental, así como los posibles criterios de intensidad real de poda aplicada en cada árbol. En este capítulo se evalúa el efecto del tratamiento de poda en copa y fuste, y se construyen modelos explicativos que relacionan el tamaño del máximo diámetro sobre muñón con variables dendrométricas sencillas. También se analiza la respuesta de los árboles al tratamiento, realizando una evaluación del proceso de cicatrización en una de las parcelas de ensayo de *Pinus radiata* y analizando la posible aparición de brotes epicórmicos en el fuste podado de ambas coníferas. Todo ello representa un paso previo para poder definir un adecuado criterio de poda para ambas especies.

En el capítulo 4, *Estudio del perfil y la forma del centro nudoso de árboles podados de Pinus radiata* D. Don y *Pinus pinaster* Aiton, se caracteriza la zona central del fuste, considerando los defectos asociados a las ramas podadas. Para ello, se analizan diferentes funciones de perfil, tratando de definir el perfil del centro defectuoso del fuste podado. Además, se presenta una comparación con los modelos

de perfil del fuste definidos para ambas coníferas en Asturias, sin considerar el centro defectuoso del árbol. Por último, y dado que la poda puede modificar la forma del tronco, se evalúa el coeficiente de forma de cada especie en función de la intensidad de poda.

En el capítulo 5, *Influencia de la poda sobre el crecimiento de árboles de Pinus radiata* D. Don y *Pinus pinaster* Aiton, se analiza el crecimiento en diámetro y altura de los árboles podados y se define un modelo de crecimiento de árbol individual para cada especie y variable dendrométrica (diámetro normal y altura total). También se analiza la influencia de la poda sobre el estatus social de los árboles y la producción de aquellos pies en los que no se produce ningún cambio sociológico durante el tiempo de estudio.

En el capítulo 6, *Estimación de la biomasa arbórea aérea y su distribución vertical en masas jóvenes regulares de Pinus pinaster* Aiton, se definen ecuaciones de biomasa de las diferentes fracciones arbóreas, para el árbol completo y por alturas, en función de variables dendrométricas sencillas. Además, las ecuaciones desarrolladas en la primera parte del capítulo son empleadas posteriormente para estimar la influencia de la intensidad de poda y la gestión de los restos generados sobre la cantidad de nutrientes y contenido de carbono de la masa forestal intervenida. Por último, los modelos de biomasa por alturas para las fracciones finas fueron empleados para evaluar el posible riesgo de incendio forestal asociado con una gestión selvícola de podas combinadas con claras.

En el capítulo 7, *Conclusiones generales y líneas futuras de investigación*, se resumen las principales conclusiones del trabajo realizado, acorde con los distintos capítulos de la tesis doctoral. Asimismo, se presentan algunas de las futuras líneas de investigación a realizar a corto y medio plazo como continuación del trabajo iniciado en la presente tesis doctoral.

Posteriormente, en la *Bibliografía general*, se presentan ordenadas alfabéticamente por autor las diferentes referencias bibliográficas consultadas durante la elaboración de esta memoria.

Por último, se incluyen en un *Anexo* las fichas descriptivas de los rodales estudiados a lo largo de este trabajo.

PREFACE

This doctoral thesis is divided into 7 chapters, which are summarised as follows:

In Chapter 1, *General introduction*, the first section justifies the study presented in this thesis and outlines its objectives. The second section presents the background that helps to understand in more detail the framework under which this work has been developed. As such, a brief description of the general issues associated with the studied species, *Pinus radiata* D. Don and *Pinus pinaster* Aiton, is presented with special attention paid to the role of both conifers in the autonomous community of Asturias, providing a brief review of the distribution of each species in the territory of Asturias, their silvicultural management, the most important biotic and abiotic conditions for their development and their forest harvesting. Furthermore, it describes some of the key factors in relation to timber quality and the role of pruning in the quality of wood and its effect on the stand persistence.

Chapter 2, *Materials and Methods*, provides a general description of the network of plots studied in this thesis, defining more specifically the experimental design and methodology of data collection, their processing and analysis.

In Chapter 3, *Characterization and evaluation of pruning in Pinus radiata* D. Don and *Pinus pinaster* Aiton young and even-aged stands, the initial pruning criteria selected in the experimental design and the true intensity criteria applied to each pruned tree are analysed. This chapter assesses the effect of pruning on tree crown and stem and explanatory models that relate the size of maximum diameter over stubs with stand variables are constructed. It also analyses the response of trees to treatment, and an assessment of the wound healing process in one of the *Pinus radiata* plots is reported and the development of epicormic sprouts in the pruned stem of both conifers is analysed. This represents a first step to defining an appropriate pruning criterion for both species.

In Chapter 4, *Study of the knotty core tapering and form of Pinus radiata* D. Don and *Pinus pinaster* Aiton pruned trees, the central stem is characterized considering the defects associated with pruned branches. To do this, different taper functions are analysed, in an attempt to define the profile of the knotty core of the pruned stem. Furthermore, a comparison with the taper equations (irrespective of the defect core) defined for both conifers in Asturias is presented. Finally, given that pruning can modify the stem form, the form exponent of each species is evaluated in relation to pruning intensity.

In Chapter 5, *Influence of pruning on tree growth of Pinus radiata* D. Don and *Pinus pinaster* Aiton, the diameter and height growth of pruned trees are assessed and an individual tree growth model is defined for each species and variable at tree level (diameter at breast height and total height). It also analyses the influence of

pruning on the social status of the trees and the production of those trees where no sociological changes occurred during the study period.

In Chapter 6, *Estimation of aboveground tree biomass and its vertical distribution in young and even-aged Pinus pinaster Aiton stands*, biomass equations, by total tree and by-height, for the different tree fractions are defined, using tree level variables. Furthermore, the equations developed in the first part of the chapter are then used to estimate the influence of pruning intensity and the management of the residual biomass obtained on the amount of nutrients and the carbon content of the forest system as a whole. Finally, biomass models for the estimation of by-height fine biomass were used to assess the potential wildfire risk associated with pruning combined with thinning.

In Chapter 7, *General conclusions and future lines of research*, the main conclusions of the work are summarised according to the different chapters of this thesis. It also presents some of the most salient future research required in the short and medium term to compliment and extend the work started in this thesis.

Subsequently, in *General bibliography*, a reference list of sources consulted in writing this thesis, arranged alphabetically by author, is included.

Finally, included in an *Annex* are several description sheets of the stands studied throughout this work.

ÍNDICE

ÍNDICE GENERAL.....	i
ÍNDICE DE TABLAS.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
GLOSARIO.....	xix
RESUMEN.....	xxvii
ABSTRACT.....	xxxv

ÍNDICE GENERAL

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1.1. Justificación y objetivos.....	3
1.2. Antecedentes.....	7
1.2.1. Características generales de <i>Pinus radiata</i> y <i>Pinus pinaster</i>	7
1.2.1.1. Descripción y características de <i>Pinus radiata</i>	7
1.2.1.2. Descripción y características de <i>Pinus pinaster</i>	13
1.2.1.3. Situación forestal de <i>Pinus radiata</i> y <i>Pinus pinaster</i> en Asturias.....	17
1.2.1.4. Condicionantes bióticos: situación sanitaria de <i>Pinus radiata</i> y <i>Pinus pinaster</i> en Asturias.....	22
1.2.1.5. Condicionantes abióticos: los incendios forestales en masas de <i>Pinus radiata</i> y <i>Pinus pinaster</i> en Asturias.....	27
1.2.1.6. Condicionantes selvícolas de <i>Pinus radiata</i> y <i>Pinus pinaster</i> en Asturias.....	31
1.2.1.7. Los aprovechamientos forestales maderables de <i>Pinus radiata</i> y <i>Pinus pinaster</i> en Asturias.....	34
1.2.2. La ramiosidad y sus efectos en la calidad de la madera.....	37
1.2.2.1. Las ramas epicórmicas.....	41
1.2.3. La poda.....	42
1.2.3.1. Características generales de la poda: definición, tipos y objetivos.....	42
1.2.3.2. Podas para producir madera de calidad en coníferas.....	45

Capítulo 2

MATERIAL Y MÉTODOS.....	53
-------------------------	----

2.1. Dispositivo de parcelas.....	55
2.1.1. Selección de las parcelas	55
2.1.2. Características de las parcelas	57
2.2. Diseño del ensayo.....	58
2.2.1. Caracterización inicial y definición de la intensidad de poda diseñada	58
2.2.2. Diseño experimental.....	61
2.3. Instalación de la primera fase de los ensayos.....	65
2.4. Datos (medición de las parcelas).....	66
2.4.1. Inventario de variables dendrométricas clásicas y variables de poda	68
2.4.2. Seguimiento de cicatrización y aparición de brotes epicórmicos.....	70
2.4.3. Muestreo de árboles para biomasa	71
2.5. Elaboración de los datos.....	73
2.5.1. Variables de copa y fuste relacionadas con la poda	74
2.5.2. Variables dendrométricas y dasométricas clásicas.....	77
2.5.3. Fracciones de biomasa.....	85
2.5.4. Caracterización de la estructura de la masa y la competencia.....	87
2.6. Métodos.....	89
2.6.1. Estudio de las variables de poda.....	90
2.6.1.1. Intensidad real de poda a nivel individual.....	90
2.6.1.2. Variables relacionadas con la copa y el fuste podado (ramosidad y diámetro sobre muñón).....	90
2.6.1.3. Formación del centro con defectos.....	91
2.6.1.4. Cicatrización.....	92
2.6.1.5. Brotes epicórmicos	92
2.6.2. Estudio del perfil y la forma del centro nudoso	93
2.6.2.1. Perfil del centro nudoso.....	93
2.6.2.2. Estimación del diámetro sobre muñón mediante curvas de perfil del fuste sin defectos	94
2.6.2.3. Forma del centro nudoso	95
2.6.3. Estudio del crecimiento	95
2.6.3.1. Crecimiento individual del diámetro y altura del árbol en función de la poda	95
2.6.3.2. Modelización del crecimiento individual en diámetro y altura.....	96
2.6.3.3. Influencia de la poda sobre el estatus social y la producción unitaria del árbol.....	97
2.6.4. Estudio de la biomasa arbórea aérea	97
2.6.4.1. Modelización de la biomasa del árbol completo.....	97
2.6.4.2. Modelización de la biomasa del árbol hasta una altura o diámetro límite	98
2.6.4.3. Ajuste simultáneo del sistema de ecuaciones.....	98

2.6.4.4. Caracterización de la distribución real de la biomasa arbórea aérea y de su contenido de nutrientes.....	100
2.6.4.5. Distribución de la densidad de combustibles finos en el dosel de copas	101
2.6.5. Análisis estadístico	105
2.6.5.1. Técnicas de ajuste de los modelos.....	105
2.6.5.2. Detección y corrección de la heterocedasticidad	110
2.6.5.3. Detección y corrección de la autocorrelación	112
2.6.5.4. Ajuste de sistemas de ecuaciones relacionadas.....	114
2.6.5.5. Evaluación de los modelos	117
2.6.5.6. Otros análisis y diagnósticos estadísticos.....	119

Capítulo 3

CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LA PODA EN MASAS JÓVENES REGULARES DE <i>Pinus radiata</i> D. Don Y <i>Pinus pinaster</i> Aiton	125
3.1. Introducción.....	127
3.2. Material y métodos	132
3.2.1. Datos empleados.....	132
3.2.1.1. Caracterización de la poda	133
3.2.1.2. Formación del centro con defectos.....	134
3.2.1.3. Cicatrización de las heridas de poda	134
3.2.1.4. Brotes epicórmicos	135
3.2.2. Tratamiento y análisis de los datos.....	136
3.2.2.1. Caracterización de la poda	136
3.2.2.2. Formación del centro con defectos.....	138
3.2.2.3. Cicatrización de las heridas de poda	138
3.2.2.4. Aparición de brotes epicórmicos tras la poda	139
3.3. Resultados y discusión	140
3.3.1. Caracterización de la poda	140
3.3.1.1. Intensidad real de poda a nivel individual.....	140
3.3.1.2. Variables relacionadas con la copa	141
3.3.1.3. Variables relacionadas con el fuste podado: ramosidad.....	142
3.3.1.4. Variables relacionadas con el fuste podado: diámetro sobre muñón	146
3.3.2. Formación del centro con defectos.....	154
3.3.3. Cicatrización de las heridas de poda	158
3.3.4. Aparición de brotes epicórmicos tras la poda.....	170
3.4. Conclusiones	180

Capítulo 4

ESTUDIO DEL PERFIL Y LA FORMA DEL CENTRO NUDOSO DE ÁRBOLES PODADOS DE <i>Pinus radiata</i> D. Don Y <i>Pinus pinaster</i> Aiton	185
4.1. Introducción.....	187

4.2. Material y métodos	195
4.2.1. Datos empleados.....	195
4.2.2. Tratamiento y análisis de los datos.....	200
4.2.2.1. Perfil del centro defectuoso	200
4.2.2.2. Forma del fuste.....	205
4.3. Resultados y discusión	206
4.3.1. Perfil del centro defectuoso	206
4.3.1.1. Función de perfil definida para el fuste con defectos.....	206
4.3.1.2. Estimación del diámetro sobre muñones mediante curvas de perfil del fuste sin defectos	210
4.3.2. Forma del fuste.....	214
4.4. Conclusiones	216

Capítulo 5

INFLUENCIA DE LA PODA SOBRE EL CRECIMIENTO DE ÁRBOLES DE <i>Pinus radiata</i> D. Don Y <i>Pinus pinaster</i> Aiton	219
5.1. Introducción.....	221
5.2. Material y métodos.....	231
5.2.1. Datos empleados.....	231
5.2.2. Tratamiento y análisis de los datos.....	233
5.2.2.1. Crecimiento individual del árbol en función de la poda	234
5.2.2.2. Modelo explicativo del crecimiento individual del árbol considerando la intensidad de poda efectuada y otras variables relacionadas con el crecimiento	234
5.2.2.3. Influencia de la poda sobre el estatus social y la producción unitaria del árbol.....	238
5.3. Resultados y discusión	239
5.3.1. Crecimiento individual del árbol en función de la poda	239
5.3.2. Modelo explicativo del crecimiento individual del árbol considerando la intensidad de poda y otras variables relacionadas con el crecimiento	249
5.3.3. Influencia de la poda sobre el estatus social y la producción unitaria del árbol ..	260
5.4. Conclusiones	266

Capítulo 6

ESTIMACIÓN DE LA BIOMASA ARBÓREA AÉREA Y SU DISTRIBUCIÓN VERTICAL EN MASAS JÓVENES REGULARES DE <i>Pinus pinaster</i> Aiton	269
6.1. Introducción.....	271
6.2. Material y métodos.....	283
6.2.1. Datos empleados.....	283

6.2.2. Tratamiento de los datos.....	289
6.2.2.1. Modelización de la biomasa arbórea aérea.....	290
6.2.2.2. Caracterización de la distribución real de la biomasa arbórea aérea y de su contenido de nutrientes.....	296
6.2.2.3. Distribución de la densidad de combustibles finos en el dosel de copas	297
6.3. Resultados y discusión	302
6.3.1. Modelización de la biomasa arbórea aérea.....	302
6.3.1.1. Ajuste individual de la biomasa aérea del árbol completo.....	302
6.3.1.2. Ajuste individual de la biomasa aérea del árbol hasta una altura límite	305
6.3.1.3. Ajuste simultáneo de la biomasa aérea del árbol completo y por alturas.....	306
6.3.2. Caracterización de la distribución real de la biomasa arbórea aérea y de su contenido de nutrientes.....	314
6.3.2.1. Distribución y acumulación de la biomasa del fuste para el árbol completo	316
6.3.2.2. Distribución y acumulación de la biomasa de la copa para el árbol completo	317
6.3.2.3. Distribución y acumulación de la biomasa de la copa por alturas	318
6.3.2.4. Balance nutricional de las fracciones de biomasa arbórea aérea.....	323
6.3.2.5. Biomasa y fijación de carbono a nivel de masa	329
6.3.3. Distribución de la densidad de combustibles finos en el dosel de copas	333
6.3.3.1. Estimación del perfil de densidad aparente del combustible fino, y las variables <i>CBDe</i> y <i>CBH</i> antes y después de poda: situación real.....	333
6.3.3.2. Estimación del perfil de densidad aparente del combustible fino, y las variables <i>CBDe</i> y <i>CBH</i> antes y después de podas y/o claras: simulación de los tratamientos selvícolas.....	336
6.3.3.3. Ajuste y modelización de la función de densidad de Weibull	347
6.4. Conclusiones	351

Capítulo 7

CONCLUSIONES GENERALES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN – GENERAL CONCLUSIONS AND FUTURE LINES OF RESEARCH.....	359
7.1. Conclusiones generales	361
7.2. Líneas futuras de investigación	362
7.3. General conclusions	365
7.4. Future lines of research	366
 BIBLIOGRAFÍA GENERAL	 371
ANEXO	419

ÍNDICE DE TABLAS

Capítulo 1

Tabla 1.1. Síntomas comunes y específicos de los principales hongos y plagas que pueden atacar las masas de coníferas del noroeste de España.....	26
Tabla 1.2. Número de grandes incendios forestales (GIF) para cada Comunidad Autónoma, en función de la superficie afectada, en el período 1970-2009.	30

Capítulo 2

Tabla 2.1. Localización (comarca forestal, concejo y monte) y tipología de las parcelas evaluadas en este trabajo.	56
Tabla 2.2. Valores medios resultantes de la caracterización inicial de las masas de <i>Pinus radiata</i> y <i>Pinus pinaster</i> seleccionadas.	59
Tabla 2.3. Simulación de la intensidad de poda (%) en función del número de verticilos a mantener (Nv_r) (rango de uno a ocho) para cada parcela de ensayo permanente estudiada, destacando las intensidades de poda del 20% (color azul) y 40% (color naranja) de copa viva (L_{copa_v}).	61
Tabla 2.4. Número de verticilos a mantener para cada intensidad de poda diseñada (% de copa viva a eliminar) y parcela de ensayo en la primera fase experimental... 61	
Tabla 2.5. Valores del parámetro a_0 y estadísticos de ajuste del modelo altura-diámetro generalizado de Mønnes (1982) para cada inventario realizado en las parcelas permanentes de ensayo de <i>Pinus radiata</i> y <i>Pinus pinaster</i>	81
Tabla 2.6. Ecuaciones de estimación del volumen unitario determinadas por Canga (2008) y Arias (2009) en base al modelo de Fang <i>et al.</i> (2000) para <i>Pinus radiata</i> y <i>Pinus pinaster</i> en Asturias.	82
Tabla 2.7. Ecuaciones para la cubicación de masas de <i>Pinus radiata</i> y <i>Pinus pinaster</i> en Asturias determinadas por Canga (2008) y Barrio-Anta y Cámara-Obregón (2008), respectivamente.	82
Tabla 2.8. Promedios de las características dasométricas de las parcelas de ensayo utilizadas en la presente tesis doctoral, para los diferentes inventarios realizados.....	84

Capítulo 3

Tabla 3.1. Intensidad real de poda cuantificada mediante el porcentaje medio eliminado de verticilos vivos, verticilos totales y altura total, asociada a los tratamientos de poda definidos en el diseño experimental (0%, 20% y 40% de copa viva)..	141
Tabla 3.2. Valores medios y desviación estándar (entre paréntesis) de h_{base} , L_{copa} y D_{copa} , obtenidos en las parcelas permanentes de podas y claras de <i>Pinus radiata</i> y <i>Pinus pinaster</i> para el inventario realizado inmediatamente después de la poda (invierno 2005-2006), asociado a las intensidades reales de poda agrupadas en severidades del 15%, 30% y 45%. Distintas letras indican diferencias significativas en el test de comparación de medias de Tukey ($\alpha = 95\%$).	141

Tabla 3.3. Valores medios y desviación estándar (entre paréntesis) de las variables Nv_p , Nr_p y BIX , obtenidas en los ensayos de podas y claras de <i>Pinus radiata</i> y <i>Pinus pinaster</i> , en el inventario realizado inmediatamente después de la poda (invierno 2005-2006), y asociado a las intensidades reales de poda agrupadas en severidad del 15%, 30% y 45%. Distintas letras indican diferencias significativas en el test de comparación de medias de Tukey ($\alpha=95\%$).	142
Tabla 3.4. Valores medios y desviación estándar (entre paréntesis) de las variables DSM_f , DSM_m y h_{DSMm} , para las severidades de poda del 15%, 30% y 45%, en el inventario realizado inmediatamente después de la poda (invierno 2005-2006) en los ensayos permanentes de <i>Pinus radiata</i> y <i>Pinus pinaster</i> situados en los montes de La Campa y Valsera, respectivamente. Distintas letras indican diferencias significativas en el test de comparación de medias de Tukey ($\alpha=95\%$).	150
Tabla 3.5. Matriz de correlación de las variables relacionadas con la calidad de la poda DSM_i , DSM_f y DSM_m , y las variables dendrométricas d y h , medidas en el momento inmediatamente posterior a la poda (invierno 2005-2006), en árboles podados de <i>Pinus radiata</i> y <i>Pinus pinaster</i> (DSM_m tan solo en los montes de La Campa y Valsera, respectivamente). El símbolo ** indica correlaciones significativas al nivel 0,01 (bilateral).....	152
Tabla 3.6. Parámetros estimados y estadísticos de bondad del ajuste de las ecuaciones definidas para la estimación del DSM_m en función del d en el momento inmediatamente posterior a la poda, para <i>Pinus radiata</i> y <i>Pinus pinaster</i> (montes de La Campa y Valsera, respectivamente).	153
Tabla 3.7. Modelos de predicción del DSM_m en el momento inmediatamente posterior a la poda, para <i>Pinus radiata</i> y <i>Pinus pinaster</i> (montes de La Campa y Valsera, respectivamente).....	153
Tabla 3.8. Matriz de correlación de las variables relacionadas con la poda DSM_i , DSM_f y DSM_m y las variables dendrométricas d y h , medidas tres años después de la intervención (invierno 2008-2009), en los árboles podados de las parcelas permanentes de <i>Pinus radiata</i> y <i>Pinus pinaster</i> estudiadas. El símbolo ** indica correlaciones significativas al nivel 0,01 (bilateral).	155
Tabla 3.9. Matriz de correlación de variables relacionadas con la cicatrización de las heridas de poda y otras variables dendrométricas sencillas medidas en el momento inmediatamente posterior a la poda (invierno 2005-2006) en árboles podados de <i>Pinus radiata</i> pertenecientes al ensayo situado en el monte de La Campa. El símbolo ** indica correlaciones significativas al nivel 0,01 (bilateral).	164
Tabla 3.10. Matriz de correlación de la velocidad de cierre de las heridas de poda y los incrementos anuales en diámetro normal, altura total y diámetro sobre muñón del árbol, así como algunos índices de competencia independientes de la distancia, para todo el período de estudio, en árboles podados de <i>Pinus radiata</i> pertenecientes al ensayo situado en el monte de La Campa. El símbolo ** indica correlaciones significativas al nivel 0,01 (bilateral).	165
Tabla 3.11. Valores medios de la velocidad de cierre de las cuatro heridas podadas de mayor tamaño, del incremento anual en diámetro y diámetro sobre muñón en las diferentes alturas del fuste evaluadas, junto con las medias de diámetro medio de las cuatro heridas de poda de mayor tamaño, diámetro normal del árbol y diámetro máximo sobre muñón. Se diferencian los valores de los árboles en función de las heridas de mayor tamaño seleccionadas ocluidas	

cuatro años después de la poda (invierno 2009-2010) en el ensayo de <i>Pinus radiata</i> situado en el monte de La Campa.....	166
Tabla 3.12. Porcentaje de brotes epicórmicos desarrollados como respuesta a la poda, en función de su estado y posición en el árbol, dos años después de la intervención (invierno 2007-2008), para cada severidad de poda (15%, 30% y 45%), en los árboles con respuesta en las cuatro parcelas permanentes de <i>Pinus radiata</i> estudiadas.	174
Tabla 3.13. Características de los brotes epicórmicos desarrollados en función de su extensión y tamaño (solamente brotes extendidos), considerando la severidad de poda, para los árboles con respuesta presentes en las cuatro parcelas permanentes de <i>Pinus radiata</i> dos años después de la poda. Distintas letras indican distintos grupos en el test de comparación de medias de Tukey ($\alpha = 95\%$).	175
Tabla 3.14. Promedios de algunas de las principales variables dendrométricas de los cuatro ensayos permanentes de <i>Pinus radiata</i> en el momento de la poda, diferenciando los árboles que presentaron posteriormente brotes largos y los que no mostraron este tipo de brotes en el tiempo de estudio.	177

Capítulo 4

Tabla 4.1. Número de árboles y de mediciones de diámetro sobre muñón a diferentes alturas empleados en el estudio del perfil y la forma del centro defectuoso de árboles podados, diferenciando especie, parcela e inventario.....	198
Tabla 4.2. Estadísticos descriptivos de la muestra de árboles empleada.....	199
Tabla 4.3. Parámetros del modelo de Fang <i>et al.</i> (2000) obtenidos por Canga (2008) y Arias (2009) para masas de <i>Pinus radiata</i> y <i>Pinus pinaster</i> en Asturias.	204
Tabla 4.4. Estadístico de Durbin-Watson (<i>DW</i>) en función del orden de la estructura de autocorrelación autoregresiva continua.	207
Tabla 4.5. Parámetros estimados y estadísticos de bondad de ajuste resultantes del ajuste del modelo de Biging (1984) con una estructura de error continua autorregresiva de primer orden.....	208
Tabla 4.6. Valor de los parámetros y estadísticos de bondad de ajuste del modelo propuesto para la estimación del diámetro sobre muñón a partir de las curvas de perfil del fuste sin defectos de Canga (2008) para <i>Pinus radiata</i> y Arias (2009) para <i>Pinus pinaster</i>	212
Tabla 4.7. Coeficiente de forma de <i>Pinus radiata</i> y <i>Pinus pinaster</i> en función de la severidad de poda (agrupada en 15%, 30% y 45%) y el año de medición (inviernos 2008-2009 y 2009-2010). Letras diferentes indican distintos grupos en el test de comparación de Tukey ($\alpha = 95\%$).	214

Capítulo 5

Tabla 5.1. Valores característicos de algunas de las principales variables dendro y dasométricas pertenecientes a los ensayos permanentes de <i>Pinus radiata</i> y <i>Pinus pinaster</i> empleados en el estudio del crecimiento del árbol para todo el período de estudio.	232
Tabla 5.2. Estadístico de Durbin-Watson (<i>DW</i>) para un $\alpha = 0,05$ en función del orden de la estructura de autocorrelación autoregresiva continua.	250

Tabla 5.3. Estimación de los parámetros del ajuste simultáneo de las ecuaciones de crecimiento individual en diámetro y altura en <i>Pinus radiata</i> y <i>Pinus pinaster</i> .	250
Tabla 5.4. Estadísticos de bondad de ajuste de los modelos de crecimiento en diámetro y altura resultantes del ajuste simultáneo de ambas variables para <i>Pinus radiata</i> y <i>Pinus pinaster</i> .	251
Tabla 5.5. Ecuaciones de incremento en diámetro y altura ajustadas simultáneamente para árboles podados de <i>Pinus radiata</i> y <i>Pinus pinaster</i> .	252
Tabla 5.6. Evolución (%) en el reparto de árboles dominantes (clase sociológica 1) y dominados o sumergidos (clase sociológica 8), para cada especie e inventario, en función de la severidad de poda (agrupada en 15%, 30% y 45%), en todo el período de estudio (inviernos 2005-2006 a 2010-2011).	261

Capítulo 6

Tabla 6.1. Estadísticos descriptivos de los 28 árboles de <i>Pinus pinaster</i> empleados para la estimación de la biomasa arbórea aérea del presente estudio.	286
Tabla 6.2. Modelos seleccionados en la primera fase del análisis.	302
Tabla 6.3. Factores de ponderación probados en los ajustes de regresión ponderada de las ecuaciones de biomasa seleccionadas para las fracciones de madera y corteza.	304
Tabla 6.4. Ecuaciones de biomasa ajustadas individualmente mediante regresión ponderada, para las fracciones del fuste (madera y corteza), con los factores de ponderación seleccionados, y sin ponderar, para las fracciones de la copa (ramas y finos).	304
Tabla 6.5. Estadísticos de bondad de ajuste resultantes del ajuste individual ponderado, para las fracciones del fuste, y sin ponderar, para las fracciones de la copa, en el árbol completo.	305
Tabla 6.6. Expresión de los modelos de biomasa ajustados hasta una altura límite para las fracciones de la copa de <i>Pinus pinaster</i> mediante la función de distribución de Weibull.	305
Tabla 6.7. Estadísticos de bondad de ajuste resultantes del ajuste individual de las fracciones de la copa (ramas y finos) de <i>Pinus pinaster</i> hasta una altura límite.	306
Tabla 6.8. Sistema de ecuaciones de las fracciones de biomasa aérea del fuste y de la copa de <i>Pinus pinaster</i> , para el árbol completo y por alturas, ajustado de forma simultánea.	306
Tabla 6.9. Valor del estadístico de Durbin-Watson (<i>DW</i>) en función del orden de la estructura autorregresiva empleada para modelizar el término del error de las ecuaciones de biomasa de ramas y finos de la copa de <i>Pinus pinaster</i> ajustadas simultáneamente.	307
Tabla 6.10. Estadísticos de bondad de ajuste resultantes del ajuste simultáneo de las fracciones arbóreas del fuste y de la copa, para el árbol completo y hasta una altura límite, de <i>Pinus pinaster</i> .	307
Tabla 6.11. Parámetros estimados en el ajuste simultáneo de las ecuaciones de biomasa del fuste (ponderado) y de la copa (sin ponderar), para el árbol completo y por alturas, de <i>Pinus pinaster</i> .	308

Tabla 6.12. Expresión de los modelos de biomasa ajustados de forma simultánea para las fracciones arbóreas del fuste y de la copa, para el árbol completo y hasta una altura límite, de <i>Pinus pinaster</i>	309
Tabla 6.13. Concentraciones de macronutrientes en las diferentes fracciones aéreas del árbol obtenidas a partir de la submuestra de <i>Pinus pinaster</i> analizada.	323
Tabla 6.14. Niveles satisfactorios, marginales y críticos de los nutrientes foliares en <i>Pinus pinaster</i> , establecidos por Bará (1991) y Bonneau (1995) para el noroeste de España y suroeste de Francia.	324
Tabla 6.15. Concentraciones de micronutrientes en las diferentes fracciones aéreas del árbol obtenidas a partir de la submuestra de <i>Pinus pinaster</i> analizada.	326
Tabla 6.16. Biomasa forestal total (t/ha), carbono total fijado (t/ha), incremento anual de biomasa (t/ha año) y de carbono (t/ha año), para la parte arbórea aérea, diferenciada por fracciones, en el conjunto de árboles pertenecientes a los ensayos permanentes de investigación de <i>Pinus pinaster</i> , en cada inventario realizado durante el período de estudio 2006-2011.....	330
Tabla 6.17. Valores medios y desviación estándar (entre paréntesis) de <i>CBDe</i> y <i>CBH</i> obtenidos en las cuatro parcelas permanentes de <i>Pinus pinaster</i> , para los diferentes inventarios realizados; e incremento (%) de la intensidad lineal crítica (I'_L) y de la velocidad de propagación crítica (R'_{activa}) asociado a los tratamientos selvícolas realizados en campo. Distintas letras indican distintos grupos en el test de comparación de medias de Tukey ($\alpha = 95\%$).	333
Tabla 6.18. Valores de las LS-medias de <i>CBDe</i> y <i>CBH</i> obtenidos para los distintos tratamientos de podas y claras, solos o combinados, simulados; altura a la que se alcanza el valor de <i>CBDe</i> e incremento (%) de la intensidad lineal crítica (I'_L) y de la velocidad de propagación crítica (R'_{activa}) asociado a los tratamientos simulados. Distintas letras indican distintos grupos en el test de comparación de medias de Tukey ($\alpha = 95\%$).	337
Tabla 6.19. Valores medios y desviación estándar (entre paréntesis) de los parámetros b y c de la función de densidad de Weibull ajustada por mínimos cuadrados a las distribuciones verticales de densidad aparente de cada subparcela de poda, para la situación real inventariada en los ensayos permanentes de <i>Pinus pinaster</i> . Distintas letras indican diferencias significativas en el test de comparación de medias de Tukey ($\alpha = 95\%$).	347
Tabla 6.20. Modelos y estadísticos de bondad de ajuste de los mismos, para los parámetros b y c de la función de densidad de Weibull ajustada por mínimos cuadrados a las distribuciones verticales de densidad aparente de cada subparcela de poda de la red experimental de parcelas permanentes de <i>Pinus pinaster</i>	349
Tabla 6.21. Parámetros estimados en el ajuste de los modelos construidos para la determinación de los parámetros de la función de Weibull, para la caracterización de la distribución vertical de los combustibles finos en el dosel de copas de rodales regulares de <i>Pinus pinaster</i>	349

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 1

Figura 1.1. Porte juvenil y adulto, y acículas de <i>Pinus radiata</i> D. Don. Fuente: Adaptado de Rodríguez <i>et al.</i> (2006).	8
Figura 1.2. Distribución natural de <i>Pinus radiata</i> D. Don. Fuente: Elaboración propia.	10
Figura 1.3. Distribución mundial de <i>Pinus radiata</i> D. Don. Fuente: Elaboración propia.	11
Figura 1.4. Distribución de <i>Pinus radiata</i> en España. Fuente: Ruiz de la Torre (2006).	12
Figura 1.5. Localización de las Regiones de Identificación y Utilización del material forestal de reproducción (RIUs) en España. Fuente: Alía <i>et al.</i> (2005).	12
Figura 1.6. Porte juvenil y adulto, y acículas, de <i>Pinus pinaster</i> Ait. Fuente: Adaptado de Rodríguez <i>et al.</i> (2007).	14
Figura 1.7. Distribución natural de <i>Pinus Pinaster</i> Ait. Fuente: Alía y Martín (2003).	16
Figura 1.8. Localización de las regiones de procedencia de <i>Pinus pinaster</i> Ait. en España. Fuente: Alía <i>et al.</i> (1996).	17
Figura 1.9. Distribución de las masas de <i>Pinus radiata</i> D. Don en Asturias, considerando teselas en las que aparece como especie dominante. Fuente: Elaboración propia a partir del Mapa Forestal de España 1:50.000 (MIMAM, 2003).	20
Figura 1.10. Distribución de las masas de <i>Pinus pinaster</i> Ait. en Asturias, considerando teselas en las que aparece como especie dominante. Fuente: Elaboración propia a partir del Mapa Forestal de España 1:50.000 (MIMAM, 2003).	21
Figura 1.11. Distribución de la superficie arbolada quemada (período 2000-2009) en el Principado de Asturias para el total del arbolado, el total de especies de coníferas y el total de especies de frondosas (arriba); para las principales especies de frondosas (medio); y las principales especies de coníferas (abajo). Fuente: Bomberos de Asturias (comunicación personal, marzo 2011).	29
Figura 1.12. Distribución del aprovechamiento maderable de las especies de coníferas y frondosas con mayor volumen de cortas anuales en el Principado de Asturias en el período 1986-2010. Comprende montes públicos (Montes del Estado, Montes consorciados, Montes de Utilidad Pública no consorciados y Montes de Entidades Locales de libre disposición) y particulares. Fuente: Consejería de Agroganadería y Recursos Autóctonos del Principado de Asturias. Servicio de Planificación y Gestión de Montes (comunicación personal, diciembre 2011).	35
Figura 1.13. Distribución del aprovechamiento maderable de <i>P. radiata</i> , <i>P. pinaster</i> y del total de coníferas (<i>P. radiata</i> , <i>P. pinaster</i> y <i>P. sylvestris</i>) en Asturias durante el período 1986-2010. Comprende montes públicos (Montes del Estado, Montes consorciados, Montes de Utilidad Pública no consorciados y Montes de Entidades Locales de libre disposición) y particulares. Fuente: Consejería de Agroganadería y Recursos Autóctonos del Principado de Asturias. Servicio de Planificación y Gestión de Montes (comunicación personal, diciembre 2011).	35

Figura 1.14. Árbol de <i>Pinus radiata</i> cuyas ramas (izquierda) darán lugar a una madera nudosa de baja calidad (derecha).....	37
Figura 1.15. Distribución verticilar (color verde) y ángulo de inserción de las ramas (color naranja) en un árbol joven de <i>Pinus pinaster</i> Aiton.....	37
Figura 1.16. Fuste podado de un árbol de <i>Pinus pinaster</i> con las ramas inferiores muertas (izquierda) y formación de nudos muertos en la madera, que pueden llegar a desprenderse originando huecos que deprecian su valor (centro y derecha).	39
Figura 1.17. Rotura en un ensayo de una viga de <i>Pinus pinaster</i> en la zona que circunda dos nudos centrales existentes en la pieza.	39
Figura 1.18. Forma del tronco más cilíndrica para un pino podado en su parte baja (A) y más cónica para un pino sin podar, que conserva todas sus ramas (B). Fuente: Adaptado de Echevarría (1959).	41
Figura 1.19. Brotes epicórmicos desarrollados en un árbol podado de <i>Pinus radiata</i> D. Don.	42
Figura 1.20. Intervenciones de poda baja (izquierda) y poda alta (derecha) realizadas mediante tijeras de poda en una masa de <i>Pinus radiata</i> D. Don durante la instalación del dispositivo experimental empleado en la presente tesis.	43
Figura 1.21. Corte transversal de un árbol podado. Se puede apreciar el diámetro sobre muñón (<i>DSM</i>) y el diámetro sobre oclusión (<i>DSO</i>), a partir del cual se forma la madera libre de defectos (color amarillo). Fuente: Elaboración propia, adaptado de Reid y Stephen (2001).	47
Figura 1.22. Centro nudoso y madera limpia en un árbol podado con un tamaño del <i>DSM_m</i> adecuado (izquierda) y con un <i>DSM_m</i> excesivo (derecha). Fuente: Adaptado de Reid y Stephen (2001).	48
Figura 1.23. Poda para producir madera de calidad en <i>Pinus radiata</i> , realizada en varias etapas, dejando 3-4 metros de longitud de copa. Fuente: Adaptado de Private Forests Tasmania (2004).	49

Capítulo 2

Figura 2.1. Localización (concejos) de las parcelas utilizadas en la presente tesis: ensayos de podas y claras de <i>P. radiata</i> y <i>P. pinaster</i> (parcelas permanentes; marrón y verde), y estudio de biomasa arbórea de <i>P. pinaster</i> (parcelas temporales; marrón y naranja). Fuente: Elaboración propia.	56
Figura 2.2. Muestreo de árboles para la caracterización de las parcelas de origen natural utilizando el método de Muestreo de Seis Árboles (SEBAST) de Prodan (1968) modificado. Fuente: Modificado de Galera <i>et al.</i> (1997).	57
Figura 2.3. Intensidades de poda diseñadas en cada fase de intervención (arriba) y ejemplo de la poda realizada en un árbol de porvenir, en función del tratamiento en el que se encuentre (abajo): tratamiento 1, sin poda en ambas fases (árbol control); tratamientos 2 y 3, primera fase: 20% de <i>L_{copa_v}</i> eliminada y segunda fase: posa hasta <i>h_{base}</i> de 6-6,5 metros (árbol A); y tratamiento 4, primera fase: 40% de <i>L_{copa_v}</i> eliminada y segunda fase: poda hasta <i>h_{base}</i> de 6-6,5 metros (árbol B).	61
Figura 2.4. Diseño experimental de podas y claras del dispositivo de parcelas permanentes de <i>Pinus radiata</i> y <i>Pinus pinaster</i> estudiado en el presente trabajo.	62

Figura 2.5. Señalamiento de la altura de poda (izquierda) y actividad de poda con tijera (derecha) en la primera fase experimental de un ensayo permanente de <i>Pinus radiata</i> .	63
Figura 2.6. Trituración e incorporación de los restos de poda mediante desbrozadora de cadenas accionada por tractor oruga en un ensayo permanente de <i>Pinus radiata</i> .	64
Figura 2.7. Esquema del trabajo de campo desarrollado durante el período comprendido entre los inviernos 2005-2006 y 2010-2011 para la obtención de los datos empleados en la presente tesis doctoral.	65
Figura 2.8. Esquema de las principales variables dendrométricas medidas en los árboles centrales de las subparcelas de poda tras la primera intervención de poda. N_{v_r} : número de verticilos de la copa remanente tras la poda; N_{v_p} : número de verticilos podados; DSM_i : diámetro sobre muñón en el primer verticilo podado; DSM_m : diámetro máximo sobre muñón; d : diámetro normal (1,30 m); DSM_f : diámetro sobre muñón en el último verticilo podado; h : altura total; h_{base} : altura de la base de la copa; h_{DSM_i} : altura a la que se encuentra el DSM_i ; h_{DSM_f} : altura a la que se encuentra el DSM_f ; h_{DSM_m} : altura a la que se encuentra el DSM_m ; D_{copa} : diámetro de copa; Nr_p : número de ramas podadas; dr_{mi} : diámetro medio de la herida de poda de mayor tamaño del cuadrante i ; y h_{drmi} : altura a la que se encuentra las herida de poda de mayor tamaño seleccionada en el cuadrante i .	67
Figura 2.9. Caracterización de las parcelas permanentes de ensayo de <i>Pinus radiata</i> en los años sucesivos a la poda. De izquierda a derecha: forma del fuste (medición del diámetro sobre el último verticilo podado, DSM_f), cicatrización de las heridas de poda (medición de una de las cuatro heridas de poda de mayor tamaño, dr_{mi}) y brotes epicórmicos (medición de su longitud, Lbe).	69
Figura 2.10. Operaciones de campo y laboratorio para la cuantificación de la biomasa arbórea aérea, total y por alturas, de las fracciones del fuste.	71

Capítulo 3

Figura 3.1. Identificación de la herida de mayor tamaño situada en cada cuadrante del fuste podado para el cálculo del índice de ramosidad BIX . En la figura, dr_{m11} y dr_{m12} se corresponden con los diámetros cruzados de la herida podada de mayor tamaño situada en el cuadrante I, cuyo diámetro medio será dr_{m1} . Fuente: Elaboración propia, adaptado de Inglis y Cleland (1982).	135
Figura 3.2. Representación del tipo de formaciones epicórmicas en función de las características consideradas en este trabajo. En color negro se muestran dos brotes extendidos: uno grueso, largo y vivo, orientado al este (derecha); el otro fino, corto y muerto, orientado al oeste. Ambos brotes se encuentran situados en un verticilo y son originados en un nudo. En color gris se representan tres brotes no extendidos: uno vivo, situado en un verticilo, entre nudos y orientado al sur (gris, centro); otro vivo, situado entre verticilos y orientado al este (gris, derecha); y el último muerto, situado entre verticilos, orientado al oeste (gris, izquierda). Los brotes en estado vivo se muestran con líneas continuas y los muertos con líneas discontinuas. Fuente: Elaboración propia.	136

Figura 3.3. Distribución del índice de ramosidad <i>BLX</i> en los ensayos de <i>Pinus radiata</i> (izquierda, rojo) y <i>Pinus pinaster</i> (derecha, azul) estudiados.	143
Figura 3.4. Distribución del diámetro sobre muñón en el último verticilo podado (DSM_f) para los ensayos permanentes de <i>Pinus radiata</i> (izquierda, color rojo) y <i>Pinus pinaster</i> (derecha, color azul) estudiados.	146
Figura 3.5. Distribución del diámetro máximo sobre muñón (DSM_m) en el ensayo de <i>Pinus radiata</i> situado en el monte de La Campa (izquierda, rojo) y el de <i>Pinus pinaster</i> ubicado en el monte de Valsera (derecha, azul).	148
Figura 3.6. Distribución de la altura a la que se encuentra situado el diámetro máximo sobre muñón (h_{DSM_m}) en los ensayos permanentes de <i>Pinus radiata</i> (izquierda, rojo) y <i>Pinus pinaster</i> (derecha, azul) situados en los montes de La Campa y Valsera, respectivamente.	150
Figura 3.7. Gráfico de valores observados frente a valores predichos para los modelos de estimación del DSM_m definidos para <i>Pinus radiata</i> (izquierda, rojo) y <i>Pinus pinaster</i> (derecha, azul) (montes de La Campa y Valsera, respectivamente).	154
Figura 3.8. Diámetro máximo sobre muñón (DSM_m) en el momento inmediatamente posterior a la poda (DSM_{m1} , invierno 2005-2006), en relación con el DSM_m tres y cuatro años después de la intervención (DSM_{m2} , inviernos 2008-2009 y 2009-2010, respectivamente), para la parcela de ensayo de <i>Pinus radiata</i> (símbolos en tonos rojos) situada en el monte de La Campa y de <i>Pinus pinaster</i> (símbolos en tonos azules) ubicada en el monte de Valsera.	156
Figura 3.9. Crecimiento corriente medio de los diámetros sobre muñón evaluados, ic_DSM_j (ic_DSM_i , ic_DSM_f , ic_DSM_m), en función de la severidad de poda (agrupada en 15%, 30% y 45%) y la especie (<i>Pinus radiata</i> , en rojo; y <i>Pinus pinaster</i> , en azul). Letras diferentes indican distintos grupos en el test de comparación de Tukey ($\alpha = 95\%$).	158
Figura 3.10. Porcentaje medio de heridas de poda cicatrizadas dos y tres años después de la intervención (inviernos 2007-2008 y 2008-2009, respectivamente), en función de la clase diamétrica de la herida de poda (<i>Clase dr_m</i>) (izquierda) y de la severidad del tratamiento (derecha), en un rodal podado de <i>Pinus radiata</i> (monte de La Campa).	160
Figura 3.11. Diámetro medio de las cuatro heridas de mayor tamaño, una de cada cuadrante (<i>BLX</i>), en función de las clases diamétricas representativas de los árboles podados (<i>C.D.</i>) en el momento posterior a la intervención (invierno 2005-2006), y dos y tres años después de los tratamientos (inviernos 2007-2008 y 2008-2009) en un rodal podado de <i>Pinus radiata</i> (monte de La Campa).	161
Figura 3.12. Porcentaje de heridas ocluidas en función de la clase diamétrica del árbol (<i>C.D.</i>) en el momento inmediatamente posterior a la poda (invierno 2005-2006), dos y tres años después de la intervención (inviernos 2007-2008 y 2008-2009, respectivamente) en un rodal podado de <i>Pinus radiata</i> (monte de La Campa).	162
Figura 3.13. Porcentaje medio de heridas de poda cicatrizadas dos y tres años después de la intervención (inventarios 2007-2008 y 2008-2009, respectivamente), en función del cuadrante del fuste en que se encontraba situada la rama eliminada, para un rodal podado de <i>Pinus radiata</i> (monte de La Campa).	163

Figura 3.14. Porcentaje de madera limpia obtenido al final del turno en función de la clase diamétrica del árbol ($C.D.$, cm) en el momento de poda y un engrosamiento medio de 6 cm para pies de <i>Pinus radiata</i> y <i>Pinus pinaster</i> ..	167
Figura 3.15. Número medio de brotes epicórmicos (Nbe) presentes en los árboles con respuesta dos años después de la poda (invierno 2007-2008), en función de la clase diamétrica ($C.D.$, cm) (izquierda) y la clase de longitud de copa ($Clase L_{copa}$, m) del pie intervenido.....	171
Figura 3.16. Número medio de brotes por árbol considerando el fuste podado por secciones (p.e. sección 1 sería la más baja, correspondiente con 1/6 del fuste podado) (izquierda); y porcentaje de brotes epicórmicos desarrollados en el total de las parcelas de <i>Pinus radiata</i> , en función de la orientación en el tronco y la severidad de poda, dos años después de la intervención (invierno 2007-2008) (derecha).	172

Capítulo 4

Figura 4.1. Localización de las variables medidas en el fuste podado de los árboles de la muestra.	196
Figura 4.2. Gráficos de dispersión del diámetro normal con corteza (d , cm) y la altura total (h , m) de los 874 árboles, 597 de <i>Pinus radiata</i> (izquierda, rojo) y 277 de <i>Pinus pinaster</i> (derecha, azul), que conforman la muestra utilizada para el estudio de la forma y perfil del centro con defectos.....	198
Figura 4.3. Gráficos de dispersión de los pares diámetro relativo-altura relativa de <i>Pinus radiata</i> (rojo, izquierda) y <i>Pinus pinaster</i> (azul, derecha) empleados en este estudio.....	199
Figura 4.4. Representación de la diferencia entre el diámetro estimado (d_j) con una función de perfil, sin considerar los verticilos del árbol, y el diámetro real medido sobre muñón (DSM_j) a una altura h_j ($h_j = h_{DSM_j}$) del fuste podado. Fuente: Adaptado de Andenmatten <i>et al.</i> (2002).	203
Figura 4.5. Gráficos de residuos frente a residuos con un retraso (1ª columna) y residuos con dos retrasos (2ª columna) dentro del mismo árbol para el modelo final de Biging (1984), en ambas coníferas, incluyendo el término de poda, sin considerar la autocorrelación (1ª fila), y expandiendo el término del error con una estructura autorregresiva continua de orden 1 (2ª fila).	207
Figura 4.6. Gráfico de valores observados frente a valores predichos (izquierda) y de residuos frente a predichos (derecha) para el modelo final de Biging (1984), para ambas coníferas, incluyendo el término de poda y expandiendo el término del error con una estructura autorregresiva continua de primer orden.	209
Figura 4.7. Gráfico de los valores de engrosamiento frente a los valores de diámetro sobre muñón observados (izquierda) y de valores medios del engrosamiento por clases diamétricas del diámetro sobre muñón observado (derecha), para cada especie.	211
Figura 4.8. Engrosamiento medio (cm) para cada especie e intensidad de poda (severidad de poda clasificada en 15%, 30% y 45%).	212

Capítulo 5

- Figura 5.1. Gráficos de dispersión de los valores de diámetro normal con corteza (d) y altura total (h) que constituyen la muestra empleada en el estudio del crecimiento (12.405 pares de valores de *Pinus radiata* (izquierda) y 13.762 pares de valores de *Pinus pinaster* (derecha)). 232
- Figura 5.2. Incremento corriente medio para el diámetro (ic_d , cm) de *Pinus radiata* (rojo) y *Pinus pinaster* (azul) en función de la severidad de poda (agrupada en 15%, 30% y 45%), para todo el período de estudio (cuatro años para *Pinus radiata* y cinco años para *Pinus pinaster*). Distintas letras indican diferencias significativas en el test de comparación de medias de Tukey ($\alpha = 95\%$). 240
- Figura 5.3. Incremento acumulado medio para el diámetro (ia_d , cm) en cada inventario y parcela de ensayo de *Pinus radiata* (fila superior) y *Pinus pinaster* (fila inferior) en función de la severidad de poda aplicada en cada árbol (agrupada en 15%, 30% y 45%) frente a la edad del rodal. 241
- Figura 5.4. Incremento corriente medio en diámetro (ic_d , cm), para cada clase de número de verticilos de la copa remanente (Nv_r) (izquierda) y de longitud de copa (L_{copa} , m) (derecha), en *Pinus radiata* (rojo) y *Pinus pinaster* (azul). Distintas letras indican distintos grupos en el test de comparación de medias de Tukey ($\alpha = 95\%$). 242
- Figura 5.5. Relación entre la longitud de la copa remanente media en el último inventario realizado tras la poda (L_{copam} , m) y el incremento acumulado medio en diámetro (ia_d , cm), para cada parcela de ensayo de *Pinus radiata* (izquierda) y *Pinus pinaster* (derecha), en función de la severidad de poda aplicada (agrupada en 15%, 30% y 45%) durante todo el período de estudio. 244
- Figura 5.6. Crecimiento corriente medio en altura (ic_h , m) para *Pinus radiata* (línea roja, izquierda) y *Pinus pinaster* (línea azul, derecha), en función de la severidad de poda aplicada (agrupada en 15%, 30% y 45%), para todo el período de estudio. Distintas letras indican distintos grupos en el test de comparación de medias de Tukey ($\alpha = 95\%$). 245
- Figura 5.7. Incremento medio acumulado para la altura (ia_h , m) de los árboles de *Pinus radiata* (arriba) y *Pinus pinaster* (abajo) en función de la severidad de poda aplicada (agrupada en 15%, 30% y 45%) en cada parcela de ensayo. 246
- Figura 5.8. Gráficos de residuos frente a residuos con un retraso de los modelos de crecimiento en diámetro (izquierda) y altura (derecha) de *Pinus radiata*. 252
- Figura 5.9. Gráficos de residuos frente a residuos con un retraso de los modelos de crecimiento en diámetro (izquierda) y altura (derecha) de *Pinus pinaster*. 253
- Figura 5.10. Valores de residuos frente a predichos (izquierda) y observados frente a predichos (derecha) para el modelo de crecimiento en diámetro (arriba) y altura (abajo) de *Pinus radiata*. 253
- Figura 5.11. Valores de residuos frente a valores predichos (izquierda) y observados frente a predichos (derecha) para el modelo de crecimiento en diámetro (arriba) y altura (abajo) de *Pinus pinaster*. 254
- Figura 5.12. Evolución del porcentaje de árboles de cada clase sociológica, para cada especie e intensidad de poda (severidad de poda del 15%, 30% y 45%), diferenciando cada inventario (el conjunto de severidades de poda de cada especie conforman el 100% de los árboles de cada clase de estatus social e inventario). 261

Figura 5.13. Volumen unitario medio en cada inventario realizado (I, II y III), para <i>Pinus radiata</i> (izquierda, tonalidades de color rojo) y <i>Pinus pinaster</i> (derecha, tonalidades de color azul), en función de la severidad de poda aplicada (agrupada en 15%, 30% y 45%) y la clase sociológica del árbol (agrupada en dominantes, codominantes, intermedios y suprimidos).....	264
--	-----

Capítulo 6

Figura 6.1. Procedimiento general de muestreo y toma de datos para la determinación de la biomasa arbórea aérea de <i>Pinus pinaster</i>	285
Figura 6.2. Gráfico de dispersión entre el diámetro normal (d , cm) y la altura total (h , m) de la muestra de 28 árboles de <i>Pinus pinaster</i> utilizada para el estudio de la biomasa arbórea aérea.	287
Figura 6.3. Representación gráfica del peso seco (kg/árbol) de madera (1ª fila), corteza (2ª fila) y ramas gruesas (3ª fila) frente al diámetro normal (d , cm) (columna izquierda) y la altura total (h , m) (columna derecha) de los 28 pies de <i>P. pinaster</i> empleados para el estudio de la biomasa arbórea.	287
Figura 6.4. Representación gráfica del peso seco (kg/árbol) de ramas finas (1ª fila), ramillas (2ª fila), acículas (3ª fila) y ramas de la copa (4ª fila) frente al diámetro normal (d , cm) (columna izquierda) y la altura total (h , m) (columna derecha) de los 28 pies de <i>P. pinaster</i> empleados para el estudio de la biomasa arbórea.	288
Figura 6.5. Representación gráfica del peso seco (kg/árbol) de los finos de la copa frente al diámetro normal (d , cm) (izquierda) y la altura total (h , m) (derecha) de los 28 pies de <i>P. pinaster</i> empleados para el estudio de la biomasa arbórea.	289
Figura 6.6. Distribución vertical de los componentes arbóreos de la parte aérea: biomasa del fuste (W_{fuste}) y biomasa de la copa (W_{copa}).	292
Figura 6.7. Restricciones definidas para las funciones de estimación de las fracciones de la biomasa de copa la hasta una altura límite (color verde).....	294
Figura 6.8. Perfil de densidad aparente del combustible fino disponible en el dosel de copas (CBD , kg/m ³) para una hipotética masa joven regular de <i>Pinus pinaster</i> . El valor de CBD_e es el máximo del perfil y el valor de CBH es la primera altura a la que se alcanza una densidad aparente de 0,037 kg/m ³	298
Figura 6.9. Representación gráfica de los valores de peso seco (kg/árbol) predichos frente a observados, obtenidos en el ajuste simultáneo de los modelos de biomasa de <i>Pinus pinaster</i> para las fracciones arbóreas de madera (1ª fila, izquierda), corteza (1ª fila, derecha), ramas de la copa (2ª fila, izquierda) y finos de la copa (2ª fila, derecha) para el árbol completo; y fracciones de ramas de la copa (3ª fila, izquierda) y finos de la copa (3ª fila, derecha) hasta una altura límite.	310
Figura 6.10. Representación gráfica del peso seco (g/árbol) de las ramas (W_r , g), vivas (W_{r_v} , g) y muertas (W_{r_m} , g), incluyendo el peso seco de acículas, frente al diámetro de las ramas en su inserción (dr , cm), en la muestra de 28 árboles de <i>Pinus pinaster</i> estudiada.	311
Figura 6.11. Proporción (%) de las fracciones de biomasa del fuste (W_{fuste}), madera (W_m) y corteza (W_c), sobre la biomasa aérea total del árbol de <i>Pinus pinaster</i>	316

Figura 6.12. Proporción (%) de las fracciones de biomasa de la copa, diferenciada en finos de la copa (W_{rm} y W_{ac} , izquierda), y ramas de la copa (W_{rf} y W_{rg} , derecha), sobre la biomasa aérea total del árbol de <i>Pinus pinaster</i>	317
Figura 6.13. Distribución vertical real de la biomasa de copa de la muestra de 28 árboles de <i>Pinus pinaster</i> estudiada, para las fracciones de acículas (W_{ac}), ramillas (W_{rm}), ramas finas (W_{rf}) y ramas gruesas (W_{rg}), (izquierda); y para el conjunto de ramas de la copa (W_{rc}) y acículas (W_{ac}), diferenciando los árboles según su tamaño (pequeños ($d < 10$ cm) y medianos ($d \geq 10$ cm) (derecha).	319
Figura 6.14. Porcentaje de biomasa de copa (finos de la copa (W_{fc}) y de ramas de la copa (W_{rc})), extraído en la poda realizada en el invierno 2005-2006 en las parcelas permanentes de ensayo de <i>Pinus pinaster</i>	332
Figura 6.15. Perfil de la densidad aparente del combustible fino disponible en el dosel de copas (CBD , kg/m^3) para una subparcela de poda de CBD medio, perteneciente a la red de ensayos permanentes de <i>Pinus pinaster</i> , para diferentes tratamientos de podas y claras simulados de 10% en 10% (de 0% a 60%)......	340
Figura 6.16. Variable CBD en función de la densidad remanente ($N_{remanente}$, pies/ha) (izquierda) y el área basimétrica remanente ($G_{remanente}$, m^2/ha) (derecha) de las cuatro parcelas permanentes de ensayo de <i>Pinus pinaster</i> , para simulaciones de clara por lo bajo con intensidades de 10% en 10% (de 0% a 60% de G eliminada).	345
Figura 6.17. Variable CBH en función de la densidad remanente ($N_{remanente}$, pies/ha) (izquierda) y el área basimétrica remanente ($G_{remanente}$, m^2/ha) (derecha) de las cuatro parcelas permanentes de ensayo de <i>Pinus pinaster</i> , para simulaciones de clara por lo bajo con intensidades de 10% en 10% (de 0% a 60% de G eliminada).	346

GLOSARIO DE TÉRMINOS

En este glosario se tratan de recoger, ordenadas alfabéticamente, las abreviaturas y notaciones generales más utilizadas en la presente tesis doctoral. Por otra parte, se pueden encontrar en cada capítulo otros términos más específicos que han sido empleados de forma puntual a lo largo de esta memoria.

Abreviaturas	
Símbolo	Definición
Abr	Abril.
Ago	Agosto.
cit. por	Citado por.
Dic	Diciembre
<i>et al.</i>	“et alii”, abreviatura latina que se traduce al castellano como “y otros”.
Ene	Enero.
EPS	Escuela Politécnica Superior de Lugo.
Feb	Febrero.
<i>Inv</i>	Código de inventario.
Jun	Junio.
Jul	Julio.
Mar	Marzo.
May	Mayo.
Nov	Noviembre.
Oct	Octubre.
p.e.	Por ejemplo.
Sep	Septiembre.
SERIDA	Servicio Regional de Investigación y Desarrollo Agroalimentario del Principado de Asturias.
USC	Universidad de Santiago de Compostela.
UXFS	Término en gallego “ <i>Unidade de Xestión Forestal Sostible</i> ”, grupo de investigación de la Universidad de Santiago de Compostela.

Notaciones – símbolos empleados en la metodología	
Símbolo	Definición
ANOVA	Término en inglés “ <i>Analysis of Variance</i> ”, empleado para realizar análisis de varianza.
AR(q)	Estructura autorregresiva de orden q, empleada dentro del término de error de un modelo para la corrección de la autocorrelación.
CAR(q)	Estructura autorregresiva continua de orden q, empleada dentro del término de error de un modelo para la corrección de la autocorrelación.
<i>Dummy</i>	Variable ficticia que codifica un atributo particular. Presenta un valor de 0 o 1 en cada observación.
<i>DW</i>	Estadístico de Durbin Watson utilizado para la detección de la existencia de autocorrelación entre los residuos del modelo ($\alpha = 0,05$) (Durbin y Watson, 1951).
ε, e	Término residual del error.
<i>n</i>	Número de observaciones.
<i>REMC</i>	Raíz cuadrada del error medio cuadrático (expresado en las mismas unidades que la variable para la que se determina este estadístico). Empleado para la evaluación de los modelos ajustados como estadístico de bondad del ajuste.
R^2_{adj}	Coefficiente de determinación ajustado. Empleado para la evaluación de los modelos ajustados como estadístico de bondad del ajuste.
<i>x</i>	Variable independiente del modelo (<i>N</i> , en pies/ha; <i>G</i> , en m ² /ha; <i>d_g</i> , en cm; etc.).
<i>y</i>	Variable dependiente del modelo (<i>d</i> , en cm; <i>DSM_j</i> , en cm; <i>h</i> , en m, etc.).
<i>y'</i>	Variable dependiente, correspondiente con el crecimiento corriente anual de la variable a modelizar (en este caso, <i>ic_DSM_j</i> , <i>ic_d</i> e <i>ic_h</i>).
<i>y₁</i>	Valor de la variable a modelizar (<i>d</i> , en cm; <i>DSM_j</i> , en cm; <i>h</i> , en m) al principio del período de proyección (<i>t₁</i> , en años); utilizada en la ecuación de incremento anual.
<i>y₂</i>	Valor de la variable a modelizar (<i>d</i> , en cm; <i>DSM_j</i> , en cm; <i>h</i> , en m) al final del período de proyección (<i>t₂</i> , en años); utilizada en la ecuación de incremento anual.

Notaciones – variables explicativas		
Símbolo	Definición o cantidad	Unidades
B	Boro.	ppm
BAL	Término del inglés “ <i>Basal Area Larger Trees</i> ”, correspondiente con el área basimétrica de los árboles más gruesos que el árbol sujeto; índice de competencia independiente de la distancia.	m ² /ha
BALrel	BAL relativo, correspondiente con la relación existente entre el BAL y el área basimétrica (G). Su valor varía de 0 a 1.	adimensional
BIX	Término en inglés “ <i>Branch Index</i> ”, definido por Inglis y Cleland (1982) como el diámetro medio de las cuatro ramas de mayor tamaño, una de cada cuadrante, para una longitud de troza determinada.	cm
C	Contenido de carbono del rodal.	t/ha
C _j	Carbono total fijado en un momento determinado del rodal para cada fracción de la parte aérea del árbol.	t/ha
Ca	Calcio.	mg/g
CBD	Término en inglés “ <i>Canopy Bulk Density</i> ”, correspondiente con la densidad aparente de los combustibles finos disponibles en la cubierta de copas.	kg/m ³
CBD _e	CBD efectivo, correspondiente con el valor de densidad aparente efectivo, definido como el valor máximo de CBD (“ <i>Fire and Fuel Extension</i> ” del simulador “ <i>Forest Vegetation Simulator</i> ” (Beukema <i>et al.</i> , 1997; Reinhardt y Crookston, 2003)).	kg/m ³
CBDrel	Densidad aparente relativa.	adimensional
CBH	Término en inglés “ <i>Canopy Base Height</i> ”, correspondiente con la altura de la base de la copa del rodal.	m
C.D.	Clase diamétrica, definida para este trabajo con marcas de clase de 2 cm.	cm
Cu	Cobre.	mg/g
Clase1	Clase sociológica conformada por los árboles dominantes, definida en función del diámetro normal del árbol, agrupando a los 100 pies más gruesos por hectárea.	
Clase 2	Clase sociológica conformada por los árboles codominantes, definida en función del diámetro normal del árbol, agrupando a los 101-200 pies más gruesos por hectárea.	
Clases 3-6	Clase sociológica conformada por los árboles intermedios, definida en función del diámetro normal del árbol, agrupando a los 201-600 pies más gruesos por hectárea.	
Clases7-8	Clase sociológica conformada por los árboles dominados o sumergidos, definida en función del diámetro normal del árbol, agrupando todos los pies del rodal con grosores inferiores a los 600 pies más gruesos por hectárea.	
d	Diámetro normal del árbol (con corteza), medido a 1,30 m sobre el nivel del suelo, desde la parte superior de la ladera.	cm

Notaciones – variables explicativas		
Símbolo	Definición o cantidad	Unidades
D_{copa}	Diámetro de copa medio del árbol tomado desde el suelo.	m
d_g	Diámetro medio cuadrático del rodal.	cm
d_j	Diámetro con corteza (sin considerar los defectos del verticilo) que se alcanza a la altura h_j . Estimado mediante las funciones de perfil definidas para <i>Pinus radiata</i> (Canga, 2008) y <i>Pinus pinaster</i> (Arias, 2009) en Asturias, en base al modelo de Fang <i>et al.</i> (2000).	cm
d_m	Diámetro medio aritmético del rodal.	cm
d_r	Diámetro relativo correspondiente con la relación existente entre el diámetro del tronco a una altura h_j y el diámetro normal del árbol situado a 1,30 m (d_j/d).	adimensional
D_0	Diámetro dominante, correspondiente con el diámetro medio aritmético de los 100 pies más gruesos (de mayor diámetro normal) por hectárea.	cm
Dbe	Diámetro en la inserción de un brote epicórmico extendido (con tallo).	mm
$Dist_v$	Distancia entre verticilos en la copa viva.	m
$Dist_{v3}$	Distancia entre verticilos en los tres primeros metros de la copa.	m
$Dist_{v+3}$	Distancia entre verticilos por encima de los tres primeros metros de la copa.	m
dr	Diámetro medio de una rama cualquiera del árbol.	cm
dr_{mi}	Diámetro medio de la rama de mayor tamaño situada en el cuadrante i del fuste podado (tronco dividido en cuatro cuadrantes).	cm
DSM_f	Diámetro sobre muñón final, situado en el último verticilo podado.	cm
DSM_i	Diámetro sobre muñón inicial, situado en el primer verticilo podado.	cm
DSM_j	Diámetro sobre muñón situado en el verticilo podado a una altura h_j .	cm
DSM_m	Diámetro máximo sobre muñón, correspondiente con el diámetro sobre el verticilo podado de mayor grosor.	cm
DSO	Diámetro sobre oclusión, correspondiente con el diámetro de los verticilos podados, una vez cicatrizados.	cm
ΔC	Carbono total secuestrado anualmente en el rodal.	t/ha año
Δt	Tiempo de proyección, correspondiente con el período comprendido entre la edad inicial de proyección t_1 y la edad proyectada t_2 ; considerado para el crecimiento corriente en d , DSM_j y/o h .	años
ΔW	Acumulación anual de biomasa arbórea aérea del rodal.	t/ha año
E_j	Engrosamiento asociado con el verticilo situado a una altura h_j .	cm
ETP	Evapotranspiración.	mm

Notaciones – variables explicativas		
Símbolo	Definición o cantidad	Unidades
Fe	Hierro.	mg/g
FMC	Término en inglés “ <i>Foliar Moisture Content</i> ”, correspondiente con el contenido de humedad de las hojas.	%
g	Sección normal del árbol.	cm ²
G	Área basimétrica del rodal, obtenida como la suma de las secciones normales de todos los árboles que hay en una hectárea.	m ² /ha
h	Altura total del árbol.	m
h_{base}	Altura de la base de la copa del árbol.	m
h_{base_v}	Altura de la base de la copa viva del árbol.	m
h_{cr}	Altura de copa relativa, definida por la relación (h_{base}/h) . Empleada como factor descriptivo de la poda real aplicada individualmente sobre cada árbol.	adimensional
h_{drm}	Altura de ocurrencia media de las cuatro heridas de poda de mayor tamaño.	m
h_{DSMf}	Altura a la que se encuentra el diámetro sobre muñón del último verticilo podado (DSM_f).	m
h_{DSMi}	Altura a la que se encuentra el diámetro sobre muñón del primer verticilo podado (DSM_i).	m
h_{DSMj}	Altura a la que se encuentra el diámetro sobre muñón de un verticilo cualquiera del fuste podado (DSM_j).	m
h_{DSMm}	Altura a la que se encuentra el diámetro máximo sobre muñón.	m
h_i	Altura a una distancia i desde el suelo empleada para la estimación de la biomasa de copa acumulada hasta dicha altura.	m
h_i'	Altura relativa definida por la relación $((h_i - h_{base})/L_{copa})$ empleada para la estimación de la biomasa de copa acumulada hasta una altura h_i .	adimensional
h_j	Altura a una distancia j sobre el nivel del suelo a la que se estima el diámetro del tronco sin defectos d_j y el engrosamiento producido sobre d_j asociado con los muñones del verticilo podado a esa altura.	m
h_m	Altura media aritmética del rodal.	m
H_o	Altura dominante del rodal, correspondiente con la altura media de los 100 pies más gruesos por hectárea (Assmann, 1970).	m
$hIram_m$	Altura de la primera rama muerta del árbol.	cm
$hIram_v$	Altura de la primera rama viva del árbol.	cm
h_{-3}	Altura total del árbol menos tres metros.	m
I_i	Variable ficticia o <i>dummy</i> que codifica un atributo i particular (especie, severidad de poda, etc.) adquiriendo valores comprendidos entre 0 y 1.	adimensional

Notaciones – variables explicativas		
Símbolo	Definición o cantidad	Unidades
I'_L	Intensidad lineal crítica necesaria para que un incendio de superficie alcance la copa de los árboles pasando a ser un incendio de copas.	kw/m
ia_y	Crecimiento acumulado de la variable y (d, h).	Variable (cm;m)
ic_y	Crecimiento corriente de la variable y (d, DSM_j, h).	Variable (cm/año;m/año)
IH	Índice de Hart-Becking, asumiendo una distribución de árboles a marco real y/o a tresbolillo.	%
<i>Intensidad poda diseñada</i>	Intensidad de poda diseñada en gabinete para su aplicación en campo, en cada subparcela de poda, clasificada en: 0%, 20% y 40%.	%
<i>Intensidad tratamiento simulado</i>	Tratamientos de poda y/o clara simulados.	%
IS	Índice de sitio, correspondiente con la altura dominante (m) a una determinada edad de referencia (años) para un rodal regular de una determinada especie. Estimado mediante los sistemas de calidad de estación construidos para <i>Pinus radiata</i> (Canga, 2008) y <i>Pinus pinaster</i> (Álvarez-Álvarez <i>et al.</i> , 2011) en Asturias.	m
k	Coeficiente de forma, correspondiente con el exponente característico de la forma del perfil. Sus valores varían para cada tipo dendrométrico.	
K	Potasio.	mg/g
L_{copa}	Longitud de la copa total, definida como la distancia entre el ápice del árbol y la base de la copa.	m
L_{copam}	Longitud de copa media del rodal.	m
L_{copa_v}	Longitud de la copa viva, definida como la distancia entre el ápice del árbol y la base de la copa viva.	m
Lbe	Longitud de un brote epicórmico extendido (con tallo).	cm
Mg	Magnesio.	mg/g
Mn	Manganeso.	mg/g
N	Densidad; número de pies por hectárea del rodal.	pies/ha
N	Nitrógeno.	mg/g
Nbe	Número medio de brotes epicórmicos por árbol.	
Nbe_c	Número de brotes epicórmicos cortos ($Lbe < 10$ cm).	
Nbe_vert	Número de brotes epicórmicos situados entre verticilos.	
Nbe_ex	Número de brotes epicórmicos extendidos (con tallo).	
Nbe_f	Número de brotes epicórmicos finos ($Dbe < 3$ mm).	
Nbe_g	Número de brotes epicórmicos gruesos ($Dbe > 3$ mm).	

Notaciones – variables explicativas		
Símbolo	Definición o cantidad	Unidades
Nbe_l	Número de brotes epicórmicos largos ($Lbe > 10$ cm).	
Nbe_m	Número de brotes epicórmicos en estado muerto.	
Nbe_{Nex}	Número de brotes epicórmicos no extendido.	
Nbe_v	Número de brotes epicórmicos en estado vivo.	
Nbe_{vert}	Número de brotes epicórmicos situados a la altura de un verticilo.	
Nr_p	Número de ramas podadas.	
Nv_p	Número de verticilos podados.	
Nv_r	Número de verticilos de la copa remanente tras la poda.	
Nv_t	Número de verticilos totales de la copa.	
Nv_m	Número de verticilos muertos de la copa.	
Nv_v	Número de verticilos vivos de la copa.	
Nv_3	Número de verticilos en los tres primeros metros de la copa.	
Nv_{+3}	Número de verticilos por encima de los tres metros de altura.	
o_{dr_m}	Velocidad de oclusión media de las cuatro heridas de poda de mayor tamaño.	cm/año
P	Fósforo.	mg/g
P	Precipitación.	mm
P_i	Peso fresco total en monte de la fracción i .	kg
p_i	Peso fresco de la fracción i en la muestra seleccionada para su procesamiento y secado posterior en laboratorio.	kg
R'_{activo}	Velocidad de propagación crítica necesaria para que un incendio de copas pasivo pase a activarse y propagarse por el dosel.	m/min
RBA	Cociente entre la sección normal del árbol-área basimétrica y el diámetro normal-diámetro medio cuadrático $((g/G)^{d/d_g})$; índice de competencia independiente de la distancia.	adimensional
R_{copa}	Ratio de copa, calculado como la relación entre la longitud de copa y la altura total del árbol $((h-h_{base}/h))$.	adimensional
R_g	Cociente entre la sección normal del árbol y el área basimétrica del rodal (g/G) ; índice de competencia independiente de la distancia.	adimensional
Rd_g	Cociente entre el diámetro normal del árbol y el diámetro medio cuadrático del rodal (d/d_g) ; índice de competencia independiente de la distancia.	adimensional
Rd_m	Cociente entre el diámetro normal del árbol y el diámetro medio del rodal (d/d_m) ; índice de competencia independiente de la distancia.	adimensional
RD_0	Cociente entre el diámetro normal del árbol y el diámetro dominante del rodal (d/D_0) ; índice de competencia independiente de la distancia.	adimensional

Notaciones – variables explicativas		
Símbolo	Definición o cantidad	Unidades
<i>Severidad poda</i>	Intensidad de poda, en cada árbol, clasificada en: 15%, 30% y 45%.	%
<i>t</i>	Edad media de los árboles del rodal.	años
<i>T</i>	Temperatura.	°C
<i>v</i>	Volumen unitario del árbol (con corteza), determinado a partir de las ecuaciones definidas para <i>Pinus radiata</i> (Canga, 2008) y <i>Pinus pinaster</i> (Arias, 2009) en Asturias.	m ³
<i>V</i>	Volumen del rodal (con corteza), determinado a partir de las ecuaciones de cubicación de masas de <i>Pinus radiata</i> (Canga, 2008) y <i>Pinus pinaster</i> (Barrio-Anta y Cámara-Obregón, 2008) en Asturias.	m ³ /ha
<i>W</i>	Biomasa forestal aérea total, para el conjunto de árboles del rodal.	t/ha
<i>W_{ac}</i>	Biomasa total de acículas de la copa.	kg
<i>W_c</i>	Biomasa total de corteza del árbol.	kg
<i>W_{copa}</i>	Biomasa total de la copa (acículas, ramillas y ramas: finas y gruesas).	kg
<i>W_{fc}</i>	Biomasa total de los elementos finos de la copa (ramillas y acículas).	kg
<i>W_{fuste}</i>	Biomasa total del fuste (madera y corteza).	kg
<i>W_{hi}</i>	Biomasa total de la fracción de la copa <i>i</i> hasta una altura <i>h_i</i> .	kg
<i>W_i</i>	Biomasa total de la fracción arbórea <i>i</i> en la parte aérea del árbol.	kg
<i>W_m</i>	Biomasa total de madera.	kg
<i>W_{rf}</i>	Biomasa total de las ramas finas de la copa (diámetros de 0,6-2 cm).	kg
<i>W_{rg}</i>	Biomasa total de las ramas gruesas de la copa (diámetros de 2-7 cm).	kg
<i>W_{hfc}</i>	Biomasa de las fracciones finas de la copa hasta una altura determinada <i>h_i</i> .	kg
<i>W_{hrc}</i>	Biomasa de las ramas de la copa hasta una altura determinada <i>h_i</i> .	kg
<i>W_j</i>	Biomasa forestal total para cada fracción de la parte aérea del árbol, en un momento determinado del rodal.	t/ha
<i>W_r</i>	Biomasa total de las ramas de la copa, incluyendo acículas.	g
<i>W_{rc}</i>	Biomasa de las ramas de la copa sin acículas.	kg
<i>W_{r_m}</i>	Biomasa total de las ramas muertas de la copa.	g
<i>W_{r_v}</i>	Biomasa total de las ramas vivas de la copa, incluyendo acículas.	g
<i>Zn</i>	Zinc.	mg/g

RESUMEN

Esta tesis doctoral presenta los resultados preliminares de un trabajo de investigación orientado a producir madera de sierra de calidad, bajo una silvicultura sostenible, en masas regulares de *Pinus radiata* D. Don y *Pinus pinaster* Aiton en Asturias. El objetivo del trabajo es evaluar el efecto de las podas y las claras en el crecimiento, desarrollo y calidad de la madera en ambas especies, así como la influencia de distintos modelos de gestión en la persistencia y desarrollo sostenible de las masas en aspectos relacionados con el balance nutricional, el contenido de carbono y el riesgo de incendio de la masa.

Los ensayos permanentes empleados en este trabajo fueron instalados en el invierno 2005-2006 en masas jóvenes regulares de ambas especies. Tras la instalación de las parcelas se llevó a cabo la primera fase experimental de los ensayos, en la que fue realizada una primera poda bajo diferentes intensidades. Después de esta intervención, se realizó un inventario exhaustivo de las masas para la evaluación y caracterización de la poda aplicada en cada pie de forma individual. En los años sucesivos al tratamiento fueron realizados diversos inventarios en los que se tomaron variables dendrométricas asociadas con la intervención de poda, la forma del fuste y el tamaño del árbol. El período de estudio planteado para este trabajo comenzó a finales de 2005 y terminó a finales de 2010-inicios de 2011, coincidiendo estas fechas con la puesta en marcha de la segunda fase experimental de los ensayos: realización de la primera clara y de la poda alta. La mayoría de las variables dendrométricas evaluadas en los inventarios (diámetro normal, altura total, etc.) se tomaron en todos los árboles pertenecientes a la red de ensayos, siendo caracterizadas otras variables más específicas de los tratamientos de poda (diámetro máximo sobre muñón, cicatrización, brotes epicórmicos, etc.) en alguno de los ensayos. Dado que para ciertos objetivos planteados era necesario realizar un muestreo destructivo detallado de las diferentes fracciones arbóreas, fueron instaladas adicionalmente parcelas temporales, en el invierno 2008-2009, sobre masas regulares de *P. pinaster*, en las que fueron caracterizadas variables dendrométricas y de biomasa. Además, tanto en las parcelas permanentes como en las parcelas temporales se incluyó la recogida de muestras de suelo para su análisis físico y químico en un laboratorio externo acreditado.

El tratamiento de poda fue caracterizado en cada árbol mediante la medición de variables de copa y fuste en el inventario realizado inmediatamente después de la intervención en las parcelas permanentes de la red experimental. Las variables de copa fueron tomadas en todos los árboles podados (5.425 de *P. radiata* y 6.002 de *P. pinaster*), a excepción del diámetro de copa que fue evaluado tan solo en dos de los árboles centrales de cada subparcela de poda (480 de *P. radiata* y 512 de *P.*

pinaster). Las principales variables de fuste fueron medidas en campo para los árboles centrales de cada subparcela de poda (2.160 de *P. radiata* y 2.304 de *P. pinaster*), a excepción del diámetro sobre muñón situado en el verticilo de mayor grosor, conocido como diámetro máximo sobre muñón (DSM_m), que fue medido únicamente en una parcela de cada especie (576 árboles centrales en cada ensayo).

Una vez realizadas las intervenciones de poda y efectuados los inventarios, se valoraron diferentes criterios para la definición de la intensidad real del tratamiento aplicada sobre cada pie. La descripción de la poda real en función de la altura relativa eliminada fue un criterio más exacto que el número de verticilos de la copa. De esta manera, la altura relativa eliminada fue seleccionada para describir la intensidad real de poda, expresada también en porcentaje y agrupada en tres severidades de poda (15%, 30% y 45%).

El DSM_m ha sido una variable de referencia para describir la calidad de la poda y el momento óptimo de la intervención en los países de mayor experiencia selvícola para la obtención de madera de calidad. La caracterización de este diámetro en el momento inmediatamente posterior a la intervención de poda mostró en este trabajo menores valores para *P. pinaster* que en el caso de *P. radiata*, indicando *a priori* una intervención temporal más adecuada para *P. pinaster* teniendo en cuenta el objetivo de producción de madera de calidad libre de nudos. El tamaño del DSM_m mostró una buena correlación con otras variables dendrométricas del árbol, encontrando la mejor asociación para el diámetro normal (d). Esta buena asociación entre el DSM_m y el d del árbol fue confirmada, para una parcela de cada especie, mediante el desarrollo de modelos lineales sencillos de predicción del DSM_m en el momento de la poda en ambas especies. Para la definición de los modelos fueron empleados datos procedentes de 576 árboles centrales de cada especie. El modelo determinado para *P. pinaster* logró explicar un mayor porcentaje de variabilidad (90,20%) que en el caso de *P. radiata* (87,59%), con un menor valor de la raíz del error medio cuadrático (0,80 cm para *P. pinaster* y 1,22 cm para *P. radiata*).

El proceso de formación del centro con defectos fue analizado, de forma preliminar, a partir de los datos recogidos en sucesivas mediciones del DSM a diferentes alturas del fuste podado. Se confirmó que este diámetro presentaba también una buena relación con el d y con el DSM_m en el momento de la poda. El incremento medio anual del DSM , a diferentes alturas del fuste, mostró diferencias significativas entre especies, con un mayor incremento medio para *P. pinaster*. Este resultado, con una mayor velocidad de engrosamiento de la zona que contiene las heridas de poda, junto con el menor diámetro medio observado para las heridas de *P. pinaster*, hace pensar en unas condiciones de partida más favorables para la cicatrización de esta especie que en el caso de *P. radiata*. El crecimiento corriente

del *DSM* no mostró diferencias significativas para los verticilos podados evaluados a diferentes alturas.

La cicatrización de las heridas de poda fue evaluada en una de las parcelas de ensayo de *P. radiata* hasta el tercer transcurrido desde la intervención. Los datos empleados se correspondieron con las cuatro ramas podadas de mayor tamaño, seleccionadas en cada árbol después del tratamiento (una herida de poda en cada cuadrante del fuste). Estos datos fueron utilizados para evaluar el porcentaje de heridas cicatrizadas en el tiempo de estudio y la relación existente entre el tamaño y ubicación de las heridas con el tamaño del árbol y la severidad de la poda, así como la velocidad de cierre de las mismas con características del tamaño del árbol y de la herida de poda y de crecimiento corriente en *d* y en *DSM*. Se observó una relación positiva entre el *d* de los árboles podados y el diámetro de las heridas de poda evaluadas. La cicatrización de las mayores heridas de poda, superiores a 3 cm de diámetro, precisaron mayor tiempo para su oclusión, estando cerradas tan sólo la mitad de ellas tres años después de la intervención. Los árboles pertenecientes a las clases diamétricas por debajo de 12 cm mostraron ramas de menor grosor y el cierre completo de las cuatro heridas de mayor tamaño en el 80% de los pies a los tres años de la poda. Estos resultados sugieren la recomendación de la poda de ramas pequeñas, que no presenten una gran superficie a cicatrizar, garantizando el cierre de las heridas en el menor tiempo posible. La severidad de poda mostró menor porcentaje de cicatrización a mayor intensidad del tratamiento. La velocidad de oclusión presentó una relación positiva con el diámetro de la herida y con el tamaño del árbol, con un valor medio de dicha velocidad de 0,5 cm/año.

La aparición de brotes epicórmicos como respuesta a la poda fue evaluada en todas las parcelas de ensayo dos años después del tratamiento. En ese tiempo, no se observaron brotes epicórmicos para *P. pinaster*, pero sí para *P. radiata* (11% de los árboles podados). La caracterización de los brotes mostró el desarrollo de estas formaciones para todas las intensidades de poda efectuadas, con una escasa representación para el tratamiento de poda más débil (15%) y una mayor frecuencia para el tratamiento de poda más severo (45%). El tratamiento de mayor severidad mostró, además, la mayor proporción de brotes extendidos, observando en este tratamiento las formaciones de mayor tamaño, que podrían causar una depreciación importante en la calidad de la madera. Los árboles de menor tamaño (diámetro normal y longitud de copa remanente) en el momento de la poda, mostraron una mayor disposición para formar brotes después del tratamiento (indistintamente de su tamaño), siendo además ese tipo de árboles los que presentaron una mayor cantidad de brotes largos (longitud mayor de 10 cm). Dentro del fuste, los brotes surgidos se distribuyeron con mayor frecuencia en la mitad de la altura del fuste podado y en las orientaciones de mayor exposición (sur), siendo también más frecuente la aparición de estas formaciones entre verticilos y, dentro de los verticilos, entre nudos. La

respuesta de *P. radiata* no supuso la producción de numerosos brotes epicórmicos tras la poda, pero su mayor susceptibilidad para desarrollar estas formaciones permite constatar que, al menos para este factor, *P. pinaster* sea mejor candidato para la producción de madera de calidad.

Prevía evaluación de diversas funciones, el perfil del centro defectuoso del fuste podado fue definido para *P. radiata* y *P. pinaster* mediante el ajuste del modelo de Biging (1984). Este modelo se ha desarrollado a partir de los datos de diámetro sobre muñón tomados a diferentes alturas del tronco (DSM_j) en árboles en pie, en dos momentos diferentes transcurridos tras la poda (tres y cuatro años después de la intervención). La muestra utilizada estuvo conformada por 2.827 árboles de *P. radiata* y 1.340 árboles de *P. pinaster*. Para minimizar el efecto de la autocorrelación de los residuos, relacionada con los datos longitudinales no equidistantes utilizados, fue utilizada una estructura del error expresada como un modelo continuo autorregresivo de orden uno. El ajuste del modelo con variables *dummy* por especie no mostró diferencias significativas para ambas coníferas por lo que se llevó a cabo el ajuste de una única función de perfil para *P. radiata* y *P. pinaster*. El ajuste de este modelo fue efectuado mediante métodos de regresión no lineal. La función propuesta explicó un 98% de la variabilidad del DSM_j , con un error medio de 1,10 cm. La comparación de esta ecuación con las funciones de perfil previamente definidas para estas coníferas en Asturias (Canga (2008) para *P. radiata* y Arias (2009) para *P. pinaster*), de acuerdo con la función de Fang *et al.* (2000), en las que no se consideran los defectos asociados a los verticilos del tronco, permitió evaluar el engrosamiento producido en la zona que contiene las ramas podadas, de especial interés para la cuantificación de la parte del tronco que contiene los defectos, a partir de la cual se forma la madera libre de nudos. El engrosamiento de los verticilos mostró valores superiores a mayor diámetro de los árboles y mayor severidad de poda en ambas especies. De forma comparativa, *P. radiata* mostró los mayores engrosamientos, condicionado por unas ligeras diferencias en las parcelas de ensayo, con mayores clases diamétricas en el caso de pino radiata. Se ha ajustado una ecuación de estimación del DSM_j a partir del diámetro sin defectos (d_j) determinado mediante la funciones de perfil propuestas para estas especies por Canga (2008) y Arias (2009), en base a la ecuación de Fang *et al.* (2000), incluyendo la especie y la intervención de poda como variables explicativas del engrosamiento. Para la especie se consideró un valor constante mientras que para la severidad de poda se planteó un valor variable, añadiendo variables *dummy* asociadas a la intensidad real del tratamiento. La ecuación ajustada logró explicar un 97% de la variabilidad del DSM_j , con un error medio de 1,34 cm.

El efecto de la poda sobre la forma del tronco fue evaluado mediante la estimación del coeficiente de forma para cada especie, encontrando tres años después de la poda diferencias significativas por tratamiento (severidades de poda

del 15%, 30% y 45%) con una mayor forma cilíndrica para la poda de mayor intensidad en ambas especies. Este efecto deja de ser significativo a los cuatro años transcurridos desde la intervención.

La influencia de la poda sobre el crecimiento en diámetro y altura de los árboles de *P. radiata* y *P. pinaster* fue evaluada tras la realización de tres inventarios dasométricos en cada una de las parcelas permanentes, analizando un total de 26.167 pares de valores diámetro-altura. La respuesta en el crecimiento de los árboles a la poda fue ligeramente diferente para ambas coníferas. El sitio de ensayo también mostró diferencias significativas en el crecimiento posterior de los árboles podados. *P. pinaster* mostró un mayor reparto de los recursos para el crecimiento en diámetro, mientras que *P. radiata* mostró el mayor crecimiento para la altura. En términos generales, el tratamiento de poda afectó de forma significativa sobre el crecimiento en grosor de ambas especies, no así para el crecimiento en altura. El crecimiento individual en diámetro y altura en ambas especies fue analizado también mediante el desarrollo de modelos de árbol individual independientes de la distancia, incluyendo en su formulación variables de árbol, variables de masa, índices de competencia y variables asociadas con el tratamiento de poda efectuado. El ajuste de las funciones fue efectuado, por separado y de forma simultánea. Los modelos obtenidos en ambas especies lograron explicar un mayor porcentaje de la varianza para el incremento individual en diámetro que en el caso de la altura, siendo mayor el total de la varianza explicado por los modelos de crecimiento ajustados para *P. radiata* que en el caso de *P. pinaster* (para el diámetro 90,68% en *P. radiata* y 85,26% en *P. pinaster*; para la altura 88,15% en *P. radiata* y 84,19% en *P. pinaster*). La influencia de la poda sobre el crecimiento en grosor de los árboles mostró un cambio en la distribución de la masa, con una mayor pérdida de árboles dominantes para el tratamiento de poda de mayor severidad (45%). El volumen unitario final evaluado cuatro y cinco años después de la intervención en ambas especies mostró una reducción de la producción tras la poda, que fue menos marcada para los árboles de los estratos dominante y codominante. Atendiendo a la evaluación conjunta crecimiento-perfil, se podría apuntar que el menor volumen de los árboles podados con mayor intensidad podría verse compensado por una mayor forma cilíndrica de los mismos, cuyo aprovechamiento tecnológico resulta mucho mejor. Por otra parte, considerando la respuesta de ambas coníferas a la poda, y dadas las diferencias observadas para cada una de ellas, podría apuntarse la necesidad de adoptar unas pautas de poda específicas para cada especie.

El estudio de la distribución de la biomasa arbórea aérea de *P. pinaster* fue efectuado tras la medición, apeo y procesado de 28 árboles en las tres parcelas temporales instaladas con este fin. La evaluación de la distribución real de los componentes arbóreos del fuste y de la copa consideró las fracciones de madera, corteza, ramas gruesas (2-7 cm), ramas finas (0,6-2 cm) y ramillas (0-0,3 cm y 0,3-

0,6 cm). La madera mostró ser la más representada en el total del árbol (68%), siendo las ramillas (0-0,3 cm) las menos representadas. Los árboles de mayor diámetro mostraron un aumento en la proporción de biomasa del fuste y de ramas gruesas en el árbol, con un menor porcentaje de biomasa de las fracciones finas (ramillas y acículas) y de las ramas finas de la copa. Para las fracciones de copa, la función de distribución de Weibull mostró caracterizar adecuadamente la distribución vertical de las mismas, observando el porcentaje de cada fracción a lo largo de la copa, estando todas ellas repartidas mayormente hacia la mitad de la copa.

La biomasa total de cada componente arbóreo y la distribución vertical de la biomasa de copa fueron modelizados considerando madera y corteza, como fracciones del fuste, y ramas (ramas de 0,6-7 cm) y finos (acículas y ramillas hasta 0,6 cm), como fracciones de la copa. Las ecuaciones desarrolladas emplearon como variables independientes el d , en todos los casos, y la altura total y el ratio de copa para las fracciones del fuste y de la copa, respectivamente. Los modelos de biomasa ajustados para el árbol completo fueron de tipo alométrico mientras que las ecuaciones de biomasa ajustadas por alturas para la biomasa de copa se correspondieron con una función de distribución de Weibull de dos parámetros. El problema de la heterocedasticidad fue solucionado mediante la ponderación de las ecuaciones. Como resultado, se obtuvieron seis ecuaciones de biomasa para las fracciones madera, corteza, finos de la copa y ramas de la copa, y una séptima ecuación para la biomasa total. La aditividad del sistema de ecuaciones definido fue asegurado mediante el ajuste simultáneo de las ecuaciones. La aplicación de estos modelos permite estimar la biomasa de copa extraída en una actividad de poda, hasta una altura conocida, así como la biomasa de fuste y copa extraída en una intervención de clara en la que se corta el árbol completo.

El análisis nutricional de las diferentes fracciones arbóreas del fuste y de la copa mostró una baja proporción de macronutrientes en la madera, siendo más importante la cantidad de estos elementos en la corteza. Las fracciones de copa mostraron una acumulación importante de macronutrientes, especialmente las acículas. Esto puso de manifiesto que la poda puede suponer una importante extracción de nutrientes si los restos de esta operación selvícola son eliminados del sistema forestal intervenido. Los valores de nutrientes de las acículas reportaron niveles marginales de N y K, y niveles críticos de P, de acuerdo con el trabajo de Bará (1991) y Bonneau (1995). La proporción de micronutrientes fue menos importante para las acículas, estando la mitad de estos nutrientes en la copa.

La evaluación del contenido de carbono de un sistema forestal ha adquirido una importancia creciente en los últimos años. El análisis de nutrientes realizado para las diferentes fracciones arbóreas y los modelos de estimación de biomasa por alturas

fueron aplicados en los ensayos permanentes de *P. pinaster* para evaluar los efectos de la poda y la gestión de su biomasa residual en la reserva de carbono del sistema forestal. La relación entre el carbono total fijado y la biomasa total en este estudio fue del 57,3%. La aplicación de las ecuaciones por alturas permitió estimar la biomasa de la copa extraída en los ensayos permanentes, a nivel individual y para cada severidad de poda. En total, sin diferenciar la intensidad del tratamiento, el porcentaje medio de biomasa de copa extraído fue del 50% para las ramas de la copa y del 35% para los elementos finos. Los resultados obtenidos resaltan nuevamente la importancia de considerar el balance de nutrientes en el caso de extraer los restos selvícolas, por ejemplo para usos energéticos o evitar riesgos de incendios.

La carga de combustibles finos (acículas y ramillas hasta 0,6 cm) y su distribución a lo largo del dosel de copas determinan, junto con la humedad de dichos combustibles, el riesgo de que un incendio de superficie se transmita a las copas y su posterior comportamiento. Los modelos de predicción del riesgo de inicio y propagación de fuegos de copas, así como los que simulan el comportamiento de este tipo de fuegos, requieren conocer, entre otras cosas, los valores de dos variables estructurales del dosel de copas: “*Canopy Bulk Density*” (*CBD*) y “*Canopy Base Height*” (*CBH*), cuyos valores dependen directamente de la distribución de la carga de combustibles finos en el dosel. Estas dos variables no pueden medirse directamente en campo, por lo que es necesario contar con modelos que permitan estimarlas a partir de variables dasométricas sencillas de medir. Gracias a los modelos de distribución de biomasa en altura, ha sido posible evaluar la distribución de la carga de combustibles finos para *P. pinaster*. En cada sitio de ensayo se consideraron las intensidades de poda diseñadas así como diferentes intensidades simuladas de clara (de 0% a 60%, en rangos de 10% de área basimétrica extraída) y poda (de 0% a 60%, en rangos de 10% de altura de copa extraída) combinadas entre sí. Asimismo, fueron estimados los valores de intensidad lineal crítica y de velocidad de propagación crítica, analizando la modificación de estas variables en función del esquema selvícola considerado. De acuerdo con los distintos tratamientos de poda se observó una reducción significativa en el valor medio del *CBD* y un aumento significativo del *CBH* medio. Las diferentes intensidades de los tratamientos simulados lograron modificar el valor del *CBD*, que se vio reducido desde un 0,158 (control) a un 0,048 (poda del 60% con clara fuerte 60%), y del *CBH*, que aumentó de 1,67 (control) a 4,49 (poda del 60% con clara fuerte 60%). La evaluación de la biomasa que permanece tras la realización de las intervenciones selvícolas simuladas destacó también la importancia de la biomasa remanente y su relación con el riesgo de incendio.

Una vez obtenida la distribución de la carga de combustibles finos de cada sitio de ensayo se ha ajustado la función de densidad de Weibull a cada una de ellas y, posteriormente, se han relacionado los parámetros de dicha función de densidad (*b* y

c) con variables de rodal. Esta ecuación fue ajustada, antes y después de poda, para cada subparcela e inventario. Se observaron diferencias significativas para los parámetros de la ecuación en función del tratamiento e inventario. Se encontró una relación lineal entre los parámetros de la función de Weibull y variables sencillas de rodal, seleccionando finalmente la altura dominante y la longitud de copa del rodal para estimar ambos parámetros, siendo incluido también el número de pies por hectárea en la ecuación de estimación del parámetro c .

La aplicación de las ecuaciones estimadas en las parcelas permanentes no mostró diferencias significativas con la distribución vertical de densidad observada, salvo para una subparcela en el inventario 2008-2009. Por tanto, la ecuación de Weibull podría servir para modelizar la distribución de la carga de combustibles finos y estimar directamente el valor del *CBD* efectivo y del *CBH*, a partir de variables sencillas del rodal, para diferentes criterios de definición de la variable *CBH*.

Los modelos desarrollados en este estudio han contado, en su mayoría, con una limitación en el número de datos utilizados, siendo por ello interpretados como modelos explicativos, que no han sido validados. En todos ellos, se ha tratado de incluir alguna variable asociada con los tratamientos de poda, lo que permite un mejor entendimiento del efecto de esta intervención sobre el comportamiento posterior de los árboles y su influencia en el sistema forestal. En todo caso, los modelos permiten generar una primera información sobre posibles pautas de gestión para la maximización de la calidad del producto final, bajo una selvicultura preventiva y equilibrada para el sistema forestal. En el futuro es necesario continuar esta línea de trabajo en masas de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* en el noroeste peninsular, para mejorar el desarrollo de herramientas de gestión prácticas, que faciliten la predicción del comportamiento de los árboles y los esquemas selvícolas óptimos para la realización de la poda, sola o combinada con claras.

Palabras clave: madera libre de nudos, diámetro máximo sobre muñón, cicatrización, brotes epicórmicos, crecimiento en diámetro normal, crecimiento en altura, dominancia, biomasa arbórea aérea, nutrientes, contenido de carbono, combustible fino de la copa, distribución vertical de la biomasa de copa, función de densidad de Weibull, riesgo de incendio, densidad aparente del combustible en la cubierta de copas, altura de la base de la cubierta de copas.

ABSTRACT

This doctoral thesis presents preliminary results of a research work aimed at producing wood quality under silviculture for sustainable management in *Pinus radiata* D. Don and *Pinus pinaster* Aiton even-aged stands in Asturias. The objective of this study is to evaluate the effect of pruning and thinning on growth, development and wood quality in both species, as well as the influence of different management models on stand persistence and sustainable forest management, in relation to nutritional balance, carbon content and fire risk.

The permanent plots used in this work were established in young and even-aged stands of both species in the winter of 2005-2006. After plots were established, the first experimental phase was carried out, in which different intensities of first pruning were done. After this intervention, a thorough forest inventory to evaluate and characterize of pruning applied to each individual tree was conducted. During the years following the treatment several inventories measuring variables associated with pruning, stem form and tree size at tree level were performed. The study period for this work began in late 2005 and ended in late 2010-early 2011; the end coinciding with the launch of the second phase of the trials: first thinning and high pruning. Most of the tree level variables evaluated in the inventories (diameter at breast height, total height, etc.) were taken for all trees belonging to the trial network, with other variables more specific to the pruning treatments (maximum diameter over stubs, epicormic sprouts, etc.) also being characterized in some of the trials. Since for certain objectives detailed destructive sampling of different tree fractions were needed, temporary plots were established in the winter of 2008-2009 on regular *P. pinaster* stands, in which tree level and biomass variables were characterized. In addition, soil samples were collected in both permanent and temporal plots for physical and chemical analysis in an external accredited laboratory.

The pruning treatment was characterized for each tree by measuring crown and stem variables in the inventory taken immediately after the intervention in the permanent plots of the experimental network. Crown variables were taken for all pruned trees (*P. radiata* 5,425 and 6,002 *P. pinaster*), except for crown diameter, which was only evaluated in the two central trees of each pruning subplot (480 *P. radiata* and 512 *P. pinaster*). The main stem variables were measured in the field for the central trees of each pruning subplot (2,160 *P. radiata* and 2,304 *P. pinaster*), except the diameter of the largest whorl, known as maximum diameter over stubs (DSM_m), which was measured only in one plot of each species (the 576 central trees in each trial).

Once the pruning interventions and inventories had been made, different criteria for defining true intensity of the treatment applied to each individual tree were assessed. The description of true intensity pruning based on the relative height eliminated was more accurate than the number of whorls of the crown. Thus, relative height eliminated was selected to describe true intensity treatment, expressed as a percentage and grouped into three pruning severities (15%, 30% and 45%).

DSM_m has long been a reference variable to describe quality of pruning and optimal timing of the intervention in countries with more experience than Spain in silvicultural treatments aimed at obtaining timber quality. The characterization of this parameter immediately after pruning in this work showed lower values for *P. pinaster* than for *P. radiata*, indicating *a priori* of the suitability of the timing of this intervention for *P. pinaster* when the aim is production of knot-free quality wood. DSM_m showed a good correlation with other tree-based variables, including the best relationship with diameter at breast height (d). This positive association between DSM_m and d was confirmed, for one plot of each species by developing simple linear models predicting DSM_m at pruning time in both species. For the definition of the models data from the 576 central trees of each species were used. The specific model for *P. pinaster* explained a higher variability (90.20%) than in the case of *P. radiata* (87.59%), with a lower value of the root mean square error (0.80 *P. pinaster* cm and 1.22 cm for *P. radiata*).

The process of formation of the defect core was analyzed, initially, from diameter over stubs data at different heights collected in successive measurements on the pruned stem. It was confirmed that this diameter also had a good relationship with d and DSM_m at pruning time. The mean annual increment of DSM at different stem heights, showed significant differences between species, with a higher average increase for *P. pinaster*. This result, with a higher rate of thickening of the zone containing pruning wounds, coupled with lower average observed diameter for *P. pinaster* wounds, suggests more favorable initial conditions for the occlusion of this species than for *P. radiata*. The current annual increment of DSM showed no significant differences for pruned whorls assessed at different heights.

The process of occlusion was evaluated in one of the *P. radiata* plots until the third year after the intervention. The data from the four largest pruned branches of each tree selected after treatment (one pruning wound in each quadrant of the stem) were collected. They were then used to assess the percentage of completely occluded wounds in the time of the study and establish the relationship of the size and location of wounds with tree size and severity of pruning. In addition the relationship between time of occlusion of wounds and tree and wound characteristics, mean annual increment of d and DSM . There was a positive

relationship between d of the pruned trees and the pruning wounds diameter evaluated. For occlusion of the largest pruning wounds, we found that for wounds over 3 cm in diameter, occlusion took longer, with only half of occluding within three years of the intervention. Trees of diameter classes below 12 cm showed thinner branches and complete occlusion of the four larger wounds in 80% of the trees three years after pruning. These results indicate the pruning of thin branches, in which there is a small area to heal, since wounds close quickly. More severe pruning tended to lead to a lower percentage of healing. The time to occlusion showed a positive correlation with pruning wounds diameter and tree size, with a mean value of 0.5 cm/year.

Epicormic sprouting in response to pruning was evaluated in all plots two years after treatment. At that time, there were no epicormic sprouts for *P. pinaster*, but there were for *P. radiata* (11% of pruned trees). The characterization of epicormic sprouts showed the development of these formations for all pruning intensities, although the effect was less common in the weaker pruning treatment (15%) and higher for the more severe pruning treatment (45%). The latter also showed the highest proportion of extended sprouts; growth which could cause a depreciation in the quality of the wood. The smaller trees (those with lower diameter at breast height and mean crown length), immediately after pruning, showed a stronger likelihood of forming shoots after treatment (regardless of size). They were also those trees which had the highest number of long shoots (longer than 10 cm). In the stem, sprouts were distributed most often in the middle section of the pruned stem and on the side of greatest exposure (south), with higher frequency of occurrence between whorls, and within whorls between knots. While the response of *P. radiata* did not involve the production of very high number of trees with epicormic shoots after pruning, the increased susceptibility to develop these formations suggests that, at least in relation to this factor, *Pinus pinaster* is the better candidate for the production of quality timber.

After evaluating several model functions, defect core taper equations of pruned stems was defined for *P. radiata* and *P. pinaster* by fitting the Biging model (1984). Data from diameter over stubs taken at different heights (DSM_j) in standing trees, at two different times after pruning (three and four years after treatment) were used. The sample consisted of 2,827 trees of *P. radiata* and 1,340 trees of *P. pinaster*. To minimize the effect of the autocorrelation of the residuals, because of the non equidistant longitudinal data used, a first order continuous-time autoregressive error structure was included in the model. *Dummy* variables for the two species showed no significant differences in the model constructed, fitting the same taper function for both using nonlinear regression methods. The proposed function explained 98% of the variability of DSM_j , with an average mean square error of 1.10 cm. This equation was compared with taper functions previously defined in Asturias for *P.*

radiata (Canga, 2008) and for *P. pinaster* (Arias, 2009), according to the model of Fang *et al.* (2000), none of which include defects associated with the whorls of the stem. This enabled the evaluation of the thickening occurring in the zone containing the pruned branches which is of particular interest for differentiating the portion of the stem which contains defects, from that which is free of knots. The thickening of the whorls showed higher values in trees of larger diameter with more severity pruning in both species. Comparatively, *P. radiata* showed the greatest thickening, conditioned by slight differences in test plots, whereby the radiate pine presented higher diameter classes. An equation was developed to estimate DSM_j based on the diameter as determined using the taper functions of Canga (2008) and Arias (2009) (d_j) and including the species, pruning intervention and thickening as explanatory variables: Species was considered to be a constant value; pruning severity was taken as a variable (*dummy*) value, associated with the true intensity treatment. The fitted equation was able to explain 97% of the variability of DSM_j , with an average of root mean square error of 1.34 cm.

The effect of pruning (pruning severities of 15%, 30% and 45%) on stem form was assessed by estimating the form exponent for each species, and significant differences were found three years after treatment; greater cylindrical stems with higher pruning intensity in both species. This effect, however, was not significant four years after the intervention.

The influence of pruning on tree diameter and height growth of *P. radiata* and *P. pinaster* was assessed after the inventories in each plot, analyzing a total of 26,167 pairs of diameter-height values. The growth response of trees to pruning was slightly different for both conifers. The site factor also showed significant differences in the subsequent growth of pruned trees. *P. pinaster* showed a greater allocation of resources toward diameter growth, while *P. radiata* showed the strongest growth for height. In general, pruning treatment affected diameter growth of both species significantly, but not height growth. Individual diameter and height growth in both species was also analysed by developing individual tree growth models independent of distance, including variables at the tree and stand levels, competition indices, and variables associated with pruning treatment. The functions were fitted separately and simultaneously. The models obtained in both species were able to explain a higher percentage of variance in mean diameter increment than in the case of height, with the total variance explained by the growth models being greater for *P. radiata* than in the case of *P. pinaster* (90.68% and 85.26% for diameter respectively and 88.15% and 84.19% for height respectively). Pruning influence on tree diameter growth showed a change in the stand distribution, with an increased loss of dominant trees in the more severe pruning treatment (45%). The final tree volume evaluated four and five years after intervention in both species showed reduced production after pruning, which was less marked for trees of dominant and codominant status. In

relation to growth-taper evaluation, it should be noted that the lower volume of more intensively pruned trees could be offset by higher cylindrical stem which has great advantage in industrial processing. Moreover, considering the response of both conifers to pruning, and given the differences observed for each of them, the need for specific pruning guidelines for each species could be argued.

The study of tree aboveground biomass distribution of *P. pinaster* was made after measuring and processing 28 felled trees in the three temporary plots established for this purpose. The evaluation of the true distribution of stem and crown components included fractions of wood, bark, large branches (2-7 cm), thin branches (0.6 to 2 cm) and twigs (0-0.3 cm and 0.3 to 0.6 cm). Wood was the most important fraction in the total biomass (68%), and twigs (0-0.3 cm) the least. Larger diameter trees showed an increase in the proportion of stem biomass and thick branches, with a lower percentage of fine biomass (needles and twigs up to 0.6 cm) and thin branches. Vertical distribution of crown fractions was appropriately characterized using the Weibull distribution function, the highest percentage of each crown fraction being found in the middle of the crown.

Total biomass of each component and crown biomass vertical distribution were modeled by considering wood and bark, as fractions of the stem, and branches (branches of 0.6 to 7 cm) and fine biomass (needles and twigs up to 0.6 cm), as fractions of the crown. The independent variables used in the equations developed were d , in all cases, and total height and crown ratio in stem and crown fractions respectively. Allometric equations for estimating the total tree biomass and Weibull distribution function of two parameters for estimating by-height crown biomass were developed. The problem of heteroscedasticity was solved by weighting the equations. As a result, six equations were obtained for fractions of biomass wood, bark, fine biomass within the crown and branches biomass within the crown, and a seventh equation for total aboveground biomass. Additivity of the equations was assured by fitting equations simultaneously. The application of these models enables the estimation of crown biomass removed by pruning and stem biomass extracted in a thinning operation in which the total tree is felled.

Nutritional analysis of the different stem and crown fractions showed a low proportion of macronutrients in wood and the greatest concentration in the crown, especially needles. This suggests that pruning may involve a significant reduction in nutrients if the pruned biomass is removed from the forest system. Needles macronutrient values for the samples analysed in this study showed marginal levels of N and K, and critical levels of P, according to the values proposed by Bara (1991) and Bonneau (1995). The proportion of micronutrients in needles was less significant, even though half the total value of these nutrients were found in the crown.

Carbon content assessment of forest systems has become increasingly important in recent years. Nutrient analysis of the different tree fractions and crown biomass to any upper height limit estimated by the models developed were applied in the permanent plots of *P. pinaster* to evaluate the effects of pruning and of the management of the residual biomass on the carbon pool of each forest system. The relationship between total fixed carbon and total biomass in this study was 57.3%. The application of these equations enabled the estimation of residual crown biomass in the permanent plots, at the individual level and for each pruning severity. In total, not differentiating the intensity of treatment, the mean percentage of crown biomass removed was about 50% for branches biomass and 35% for fine biomass. The results again highlight the importance of taking into consideration the nutrient balance if the silvicultural residual biomass is to be removed, e.g. for energy or to avoid fire hazards.

Fine canopy fuel loading (needles and twigs up to 0.6 cm) and its distribution throughout the canopy determine, together with their humidity, the risk of a surface fire spreading to the crowns and its subsequent behaviour. Models for predicting the initiation and spread of crown fire, as well as the simulation of the behaviour of such fires, requires knowledge of, among other things, the values of two canopy structural variables: “*Canopy Bulk Density*” (*CBD*) and “*Canopy Base Height*” (*CBH*), whose values depend directly on the distribution of fine fuel loading in the canopy. These two variables cannot be measured directly in the field, making it necessary to have models for their estimation from simple measured stand variables. In this study, using models for estimating biomass by-height, it was possible to evaluate the vertical distribution of fine canopy fuel loading for *P. pinaster*. In each site designed pruning intensities as well as different simulated thinnings (0% to 60%, in ranges 10% removed basal area) combined with pruning (from 0% to 60% in ranges 10% extracted crown height) were considered. Also, critical linear intensity and critical propagation velocity values were estimated, analysing changes in these variables in relation to the silvicultural scenario applied. Pruning resulted in a significant reduction in the mean *CBD* along with a significant increase in the mean *CBH*. The different intensities of simulated treatments (pruning and thinning) modified the value of *CBD*, which decreased from 0.158 (control) to 0.048 (60% pruning combined with strong thinning 60%), and *CBH*, which increased from 1.67 (control) to 4.49 (60% pruning combined with strong thinning 60%). Assessment of the biomass of remaining trees in the forest system after the simulated silvicultural interventions also highlights the importance of the silvicultural residual biomass and its role in fire risk.

Once the distribution of fine canopy fuel loading of each site was obtained, Weibull density function fitted before and after pruning for each subplot and inventory was developed. Significant differences were observed for the parameters

of the equation in terms of treatment and inventory. The relationship between the parameters of this density function (b and c) and stand variables were then established. A linear relationship was found and dominant height and crown length of the stand selected to estimate both parameters, with the number of stems per hectare being included in the parameter c estimation equation.

The application of the estimated equations in the permanent plots showed no significant differences with the observed vertical density distribution, except for a single subplot in inventory 2008-2009. Thus the Weibull equation appears to be suitable for the modeling of the distribution of fine fuel canopy loading and the direct estimation of the value of effective CBD and CBH from simple stand variables for the different criteria defining CBH .

The models developed in this study have been limited by the amount of data used, thus should be interpreted as explanatory models that have not been validated. In all models, we have tried to include some variable associated with pruning treatment, thereby allowing better understanding of the effect of this intervention on the subsequent behaviour of trees and its influence on the forest system. However, the models allow the generation of preliminary information on potential management guidelines for maximizing the quality of the final product which also take into consideration a well balanced preventive silviculture for the benefit of the forest system as a whole. It is necessary to continue this line of work in the future for *Pinus radiata* and *Pinus pinaster* stands in the north-west of the Iberian Peninsular in order to further develop practical management tools that facilitate the prediction of the behaviour of trees and schedules for optimal silvicultural pruning, either alone or combination with thinning.

Keywords: clear wood, maximum diameter over stubs, occlusion, epicormic sprouts, diameter growth, height growth, dominance, aboveground tree biomass, nutrients, carbon content, fine crown fuel, vertical distribution of canopy biomass, Weibull density function, fire risk, canopy bulk density, canopy base height.



CAPÍTULO 1

Introducción general

INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1. Justificación y objetivos

Las masas de coníferas de crecimiento rápido constituyen un importante potencial forestal en la zona del arco atlántico europeo. Entre ellas, *Pinus radiata* D. Don y *Pinus pinaster* Aiton, ampliamente representadas en este ámbito, juegan un papel muy importante como especies productoras de madera, siendo las coníferas con mayor distribución y aprovechamiento maderable de Asturias, en donde encuentran unas condiciones climáticas y edáficas idóneas para su crecimiento y producción.

Las previsiones indican que la demanda mundial de madera seguirá aumentando en las próximas décadas, siendo también creciente la demanda de madera de calidad, sin nudos desde sus orígenes y cuyo valor en el mercado mundial es altamente superior. Para obtener este tipo de productos, libres de nudos, es necesario que las actividades de gestión de las masas forestales estén orientadas a mejorar el valor del producto final, siendo las podas y las claras dos de las intervenciones más destacadas para la consecución de este objetivo. De ellas, las podas permiten limitar los nudos y demás defectos asociados a las ramas en una zona central del fuste, a partir de la cual se forma madera libre de nudos. Las claras, por su parte, ayudan al crecimiento en grosor de los árboles, favoreciendo la producción de una mayor cantidad de madera. De esta manera, la adecuada realización de ambas intervenciones selvícolas bajo unas pautas de intervención acordes con la especie y ámbito geográfico, puede ayudar a obtener materias primas con mayor valor añadido en el producto final, justificando además que el gasto de ambas actuaciones selvícolas se vea amortizado en el aprovechamiento.

Países de amplia experiencia en la obtención de madera de calidad en especies de coníferas, como es el caso de Nueva Zelanda, Australia, Chile o Argentina, han logrado establecer esquemas selvícolas de referencia para las principales especies productivas de su país, obteniendo así productos reconocidos y apreciados por sus cualidades en el mercado internacional. En Europa, sin embargo, la gestión selvícola orientada a la producción de madera de calidad libre de nudos, en las principales especies de coníferas de interés productivo, apenas ha considerado la realización conjunta de ambas técnicas selvícolas, centrándose principalmente en la realización exclusiva de las claras. En el caso de España, y más concretamente del noroeste peninsular, las intervenciones de clara han sido también las más estudiadas, no habiendo un patrón de actuación óptimo que considere la realización conjunta de podas y claras para las principales coníferas presentes en esta zona del territorio.

Esta situación hace que la productividad de estas especies en el área atlántica se encuentre realmente por debajo de su potencial, dando lugar a productos maderables de menor calidad que resultan poco competitivos en el mercado mundial de la madera. Por ello, la definición de esquemas selvícolas óptimos en las masas de estas especies supondría una gran oportunidad para el sector forestal asturiano, tanto por parte de los propietarios forestales, al obtener un mayor valor final en sus masas y alcanzar la potencialidad real de sus recursos maderables, como por parte de las empresas transformadoras de la zona, al mejorar la eficiencia en la transformación y por tanto incrementar la competitividad y el valor final de sus productos.

La importancia de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* en el noroeste peninsular, y la necesidad de definir una selvicultura óptima para estas especies en el ámbito atlántico ha supuesto que el estudio del crecimiento y desarrollo de ambas coníferas, y la influencia de la selvicultura en la producción final de sus masas sean a día de hoy líneas prioritarias de investigación forestal en esta zona del territorio. En este aspecto, las claras han sido hasta el momento las intervenciones más consideradas dentro de la investigación forestal llevada a cabo en los últimos años. Esto ha ocurrido también en los países europeos de mayor tradición forestal, que han ido instalando ensayos de claras para las especies más importantes de cada país desde mediados del siglo XX (Crecente *et al.*, 2005). En el caso de España, el Departamento de Selvicultura y Mejora Forestal del Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias (antiguo IFIE), inició, desde 1968, la instalación de una red de parcelas de ensayo de claras para especies de coníferas entre las que se encontraban *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* (Rojo *et al.*, 2005). En el noroeste peninsular destaca el dispositivo de parcelas de ensayos de claras instalado por la UXFS (término en gallego de “Unidade de Xestión Forestal Sostible”) para diferentes especies de coníferas, entre las que también se encuentran *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* (Crecente *et al.*, 2005; Rojo *et al.*, 2005; Diéguez-Aranda *et al.*, 2009), siendo el primer grupo de trabajo que llevó a cabo la instalación de este tipo de ensayos en el noroeste de España. En Asturias, los estudios de claras para estas coníferas son relativamente recientes. Los ensayos de podas, por su parte, han sido menos frecuentes, tanto en España como en Europa, para la mayoría de las especies productivas. A nivel mundial, los principales estudios de poda para *Pinus radiata* han sido realizados en Nueva Zelanda, Australia, Chile y Sudáfrica (p.e. Sutton y Crowe, 1975; Lange *et al.*, 1987; Neilsen y Pinkard, 2003; Private Forests Tasmania, 2004; Mason, 2005) mientras que para *Pinus pinaster* tan solo se ha encontrado publicado un trabajo realizado en Francia (Courdier *et al.*, 2002). Para estas coníferas, en España tan solo destacan los estudios de Chauchard y Olalde (2005; 2006) para *Pinus radiata* D. Don en el País Vasco. Si bien es cierto que algunos de los trabajos de poda llevados a cabo a nivel mundial para estas especies han evaluado la realización conjunta de las podas y las claras, en Europa y en

España no se han encontrado, a día de hoy, ensayos que evalúen la realización combinada de ambas intervenciones. Por ello, resulta necesario realizar estudios que incluyan la ejecución de ambas operaciones selvícolas para la gestión óptima de las masas de estas especies que se encuentren orientadas a producir madera de calidad.

Dentro de los aspectos técnicos a considerar en una masa gestionada mediante la realización de podas para producir madera libre de nudos, resulta de gran importancia evaluar la calidad del tratamiento y definir el momento óptimo de la intervención para maximizar el valor final de la producción. También caben destacar los efectos de la operación de poda sobre el crecimiento y desarrollo posterior del árbol, así como la influencia del tratamiento sobre el proceso de cierre de las heridas y, por tanto, sobre la definición del centro con defectos, así como la forma y perfil del mismo dentro del fuste. Por otra parte, la calidad de la madera y su valor pueden verse reducidos si se produce la aparición y persistencia de brotes epicórmicos. En cualquier caso, y a pesar de la importancia de todos estos aspectos para la correcta definición de los esquemas de poda más adecuados para la producción de madera de calidad, apenas se han realizado estudios en el noroeste peninsular que consideren todos estos factores para las principales coníferas productivas presentes en esta zona del territorio.

Por otra parte, las podas y las claras pueden ayudar a reducir el riesgo de inicio y propagación de un incendio de copas (selvicultura preventiva). Esto es así, en el caso de las podas, por la eliminación de las ramas bajas de la copa, aumentando la discontinuidad vertical del combustible y, por tanto, la intensidad del fuego necesaria para que se genere un incendio de copas. La realización de las claras, por su parte, permite ampliar el espaciamiento existente entre los árboles de una masa, aumentando la discontinuidad horizontal del combustible y, por ende, reduciendo el riesgo de dispersión de un fuego de copas. Por otra parte, esta modificación del combustible arbóreo tras la realización de las podas y/o las claras puede suponer un mayor riesgo de incendio si los restos selvícolas generados no son gestionados de forma adecuada. Asimismo, la gestión de la biomasa residual de ambas intervenciones va a presentar un papel fundamental en el estado sanitario, balance nutricional y contenido de carbono del sistema forestal gestionado. Por ello, resulta de gran importancia poder cuantificar los restos generados en estas operaciones selvícolas. En el caso de las claras, pueden ser utilizadas las ecuaciones de biomasa del árbol completo definidas para estas coníferas en el noroeste peninsular (Barreiro, 2003; Merino *et al.*, 2003; Balboa, 2005; Cámara, 2006; Canga, 2008). Para el caso de los restos de poda, sin embargo, no existen ecuaciones que permitan estimar la cantidad de biomasa existente hasta una altura determinada del árbol. Por otra parte, las ecuaciones de biomasa definidas hasta el momento para ambas coníferas han considerado tan solo masas adultas. Por todo ello, resulta de gran importancia poder definir modelos de estimación de la biomasa tanto para el árbol completo como para

las distintas alturas del árbol en rodales jóvenes de estas especies. Este tipo de ecuaciones permitiría además obtener una mayor información sobre la distribución de la biomasa a lo largo del tronco, lo que resulta imprescindible para la evaluación del impacto de estas intervenciones selvícolas en la persistencia del sistema forestal.

Por todo esto y dada la necesidad de disponer de herramientas eficientes para la gestión de coníferas orientada a la producción de madera de calidad en el área atlántica, se ha instalado una red de parcelas permanentes de investigación, con un diseño experimental de podas y claras en masas regulares jóvenes de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* de Asturias. Las intervenciones selvícolas diseñadas para estos ensayos incluyen una primera poda con diferentes intensidades y una segunda poda alta combinada con distintos tratamientos de clara. La creación de esta red de ensayos permite generar una fuente importante de información para la futura modelización del efecto de ambos tratamientos selvícolas sobre el crecimiento y desarrollo de los árboles de estas especies, la calidad de los productos obtenidos durante los distintos aprovechamientos asociados a los modelos de gestión, el riesgo de inicio y propagación de un fuego de copas, el balance nutricional y el contenido de carbono de este tipo de masas forestales. Esta información favorecerá, además, la toma de decisiones para optimizar la silvicultura a aplicar, con una gestión sostenible que garantice la producción de madera de calidad y la persistencia de la masa. Por ello, y utilizando como base esta red experimental, se plantea como **objetivo general** de la presente tesis doctoral caracterizar y evaluar el efecto de la poda en árboles pertenecientes a masas jóvenes regulares de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* de Asturias (noroeste peninsular). Para alcanzar este objetivo genérico han sido planteados los siguientes **objetivos específicos**:

1. Caracterizar el tratamiento de poda, en copa y fuste (ramosidad y diámetro sobre muñón), y evaluar la respuesta al tratamiento efectuado (cicatrización y brotes epicórmicos) en árboles jóvenes pertenecientes a masas regulares de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster*.
2. Analizar la influencia de la intensidad de poda sobre el perfil y la forma del centro nudoso del tronco de árboles podados de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster*.
3. Estudiar el efecto de la poda en la dinámica de crecimiento de árboles podados de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster*, y su relación con el estatus social y la producción unitaria de los pies intervenidos.
4. Elaborar modelos para la estimación de la biomasa de las diferentes fracciones arbóreas aéreas y su distribución a lo largo del tronco, en árboles jóvenes pertenecientes a masas regulares de *Pinus pinaster*, y su aplicación para la determinación de la biomasa extraída en actividades de poda y su

relación con el balance nutricional del sistema forestal, el contenido de carbono y el riesgo de inicio y propagación de un fuego de copas.

1.2. Antecedentes

1.2.1. Características generales de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster*

1.2.1.1. Descripción y características de *Pinus radiata*

Pinus radiata D. Don pertenece a la subfamilia *Pinoideae* familia *Pinaceae*, que comprende 11 géneros y unas 250 especies. Se engloba dentro del orden *Pinales*, en la clase *Pinopsida* y dentro de la división *Pinophyta*. Es un árbol originario de la costa del Pacífico en Norteamérica. Dentro de sus poblaciones naturales se pueden diferenciar tres variedades con cinco procedencias: *var. radiata* (Año Nuevo, Monterrey y Cambria), en la que predominan tres acículas por vaina, y dos variedades isleñas, *var. binata* (Isla Guadalupe) y *var. cedrosensis* (Isla Cedros), en las que son mucho más frecuentes dos acículas (Castedo-Dorado, 2004).

Su nombre vulgar clásico es “pino de Monterrey”, como referencia a la comarca californiana de Monterrey (Estados Unidos) de donde es originaria una de sus procedencias más importantes. Aunque el nombre científico que se admite actualmente para esta especie es *Pinus radiata* D. Don, conoció otras denominaciones como *Pinus californiana*, que incide de nuevo en su origen, o *Pinus insignis*. Este último ha sido utilizado con gran frecuencia en España, a través del nombre popular de “pino insigne”, principalmente en la zona de la Cornisa Cantábrica, donde se encuentran las mayores plantaciones de esta especie en la Península Ibérica (Fernández-Manso y Sarmiento-Maillo, 2004).

Esta conífera presenta, en edades iniciales y en masas cerradas, un porte muy cónico, con alturas que pueden alcanzar los 20-30 metros. Las acículas se agrupan generalmente envainadas de tres en tres, característica que le diferencia de otras especies de pino que sólo presentan dos. Estas acículas son grandes (10-15 cm), de color verde vivo y brillante, aportándole a la copa un aspecto muy denso. Las piñas tienen carácter serotino, permaneciendo sujetas al árbol durante muchos años, conservando viable la semilla (Fernández-Manso y Sarmiento-Maillo, 2004; Rodríguez *et al.*, 2006). Su corteza es gruesa, de color pardo oscuro y profundamente agrietada (Figura 1.1).

Crece mejor en zonas con abundancia de precipitaciones (superiores a los 900 mm/año), repartidas durante todo el año, en zonas sin sequía estival pronunciada y sin temperaturas demasiado frías. No tolera los suelos encharcados, prefiriendo suelos bien drenados, de textura franco-arenosa y algo ácidos, situados

preferentemente sobre laderas o fondos de valle. Comparativamente, se puede decir que es más exigente en calidad de suelo que *Pinus pinaster*. Se desarrolla bien en altitudes inferiores a los 700 metros sobre el nivel del mar (Dans del Valle *et al.*, 1999; Rodríguez *et al.*, 2006).



Figura 1.1. Porte juvenil y adulto, y acículas de *Pinus radiata* D. Don. Fuente: Adaptado de Rodríguez *et al.* (2006).

Su madera es poco resinosa (Pérez y Vázquez, 1994), con grano de fino a medio, textura pequeña y de ligera a mediana de peso. Las trozas poseen una buena conformación general, son derechas y presentan reducida excentricidad, conicidad y elipticidad (Fernández-Golfín *et al.*, 2008). Esta rectitud permite la obtención de longitudes de troza superiores a las de *Pinus pinaster* (Dans del Valle *et al.*, 1999). La fibra es recta, pudiendo verse interrumpida por los abundantes nudos que caracterizan a esta especie, especialmente cuando no se lleva a cabo la eliminación de las ramas mediante la ejecución de podas. Es frecuente que las trozas contengan madera de compresión. La zona central presenta madera juvenil (10-20 primeros anillos), cuyas características la convierten en una madera de menor calidad y cuya proporción en el árbol puede verse reducida por la realización de la poda.

La durabilidad de la madera de esta especie es baja (Dans del Valle *et al.*, 1999). No obstante, dada la porosidad de su madera, la durabilidad puede ser mejorada mediante la aplicación de tratamientos químicos preventivos, aspecto que, tal y como destacan Fernández-Golfín *et al.* (2008), adquiere una gran trascendencia en sus usos constructivos y agrarios, al ser técnicamente posible conseguir las máximas

penetraciones de producto y conferir a la madera los más elevados grados posibles de durabilidad frente a todo tipo de agentes degradadores de la misma. Además, esta alta permeabilidad de la madera (tanto a los líquidos como al vapor de agua) favorece su secado rápido por cualquier sistema (tradicional a temperatura alta, radiofrecuencia, vacío, alta temperatura, etc.), facilita su encolado y la admisión de acabados (tintes, lasures y barnices) (Fernández-Golfín *et al.*, 2008).

Dentro de los posibles destinos de la madera de *Pinus radiata* está la madera aserrada, ya que sus propiedades físico-mecánicas y la buena forma que, en general, presentan sus troncos, hacen que su rendimiento en los procesos de aserrado sea mayor que el del resto de coníferas nacionales (Dans del Valle *et al.*, 1999; Fernández-Golfín *et al.*, 2008). Los nudos y los alabeos ocasionados por la madera juvenil y por la madera de compresión son quizá los defectos más importantes para el aserrado de su madera. Al igual que *Pinus pinaster*, y tal y como se comentó anteriormente, el secado de la madera aserrada de esta especie es relativamente fácil, lo que resulta importante dada su disposición al ataque de hongos. Cabe destacar que la madera aserrada de este pino ha sido la primera estudiada de forma sistemática y la que más veces ha sido analizada en España (Fernández-Golfín *et al.*, 2008).

Se considera que la madera de esta conífera posee una buena aptitud para el desenrollo, permitiendo obtener una chapa de buena calidad. Bajo una adecuada gestión forestal, las cualidades de su madera pueden ser sobresalientes para la obtención de chapa destinada a tableros contrachapados o estructurales. Sin embargo, la utilización de la chapa con fines decorativos no tiene mucha demanda. Los precios de la troza destinada a la producción de chapa duplican o triplican a los de la rolla de aserrío (Dans del Valle *et al.*, 1999) por lo que resulta de gran interés obtener madera que cumpla con los requisitos tecnológicos de este mercado de cara a maximizar el rendimiento de la plantación.

Fernández-Golfín *et al.* (2008) apuntan que la madera de *Pinus radiata* presenta propiedades físico-mecánicas que la convierten en un material muy apropiado para aplicaciones tanto decorativas como resistentes y que la facilidad para su secado, mecanizado, encolado, tintado y acabado hacen de ella un material muy apto para los usos de carpintería y mobiliario.

La presencia de defectos que puedan afectar a la rigidez y a la resistencia mecánica (especialmente cantidad y tamaño de nudos) puede limitar el empleo de su madera para usos estructurales. Sin embargo, los cuidados selvícolas orientados a conseguir una madera homogénea y a producir madera libre de nudos pueden mejorar la aptitud de la especie para este uso industrial (Dans del Valle *et al.*, 1999).

De forma general, las distintas aplicaciones que tiene su madera, según su calidad, son: la fabricación de piezas para muebles, fabricación de ventanas, carpintería de revestimientos, madera para construcción (utilizada en la fabricación

de elementos estructurales), postes, apeas, estacas para agricultura, apta también para su uso en la industria de tableros aglomerados (tableros de partículas), tableros de fibras y pasta de papel (Dans del Valle *et al.*, 1999; Vignote *et al.*, 2000).

1.2.1.1.1. Distribución y expansión de *Pinus radiata*

Pinus radiata es un pino con una distribución de poblaciones naturales reducida a 6.000 hectáreas, conformada por tres procedencias costeras de California Central: Año Nuevo (450 hectáreas), Monterrey (3.800 hectáreas) y Cambria (900 hectáreas), así como dos pequeñas poblaciones de las islas mejicanas de Guadalupe y Cedros (Aragones *et al.*, 1994; Wu *et al.*, 2007) (Figura 1.2).

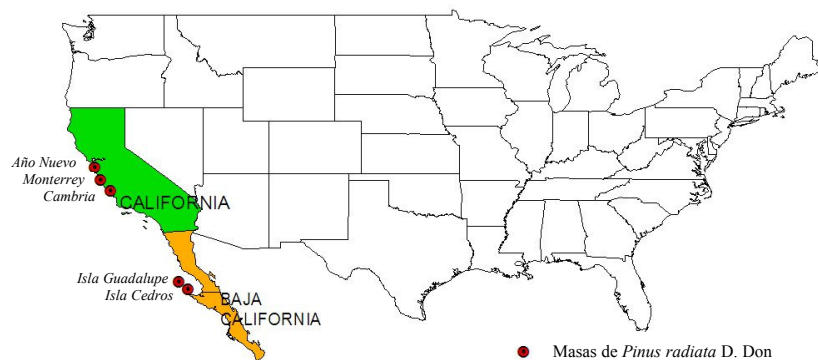


Figura 1.2. Distribución natural de *Pinus radiata* D. Don. Fuente: Elaboración propia.

Aunque en su región de origen estas procedencias no tienen importancia económica, desde finales del siglo XIX se difundió artificialmente por varios continentes demostrando un gran potencial productivo en climas más húmedos y templados que el de origen.

Existen diversas razones que han propiciado su gran expansión. De acuerdo con Dans del Valle *et al.* (1999) y Castedo-Dorado (2004), algunas de las más importantes, serían: el gran crecimiento de la especie, la precocidad con que alcanza los máximos de producción en volumen, la calidad de su madera para diversos usos, las posibilidades de recoger grandes cantidades de semilla y su fácil propagación, la relativa diversidad genética dentro de sus poblaciones naturales, que pueden proporcionar genotipos adecuados para diferentes ambientes, así como su gran plasticidad y flexibilidad selvícola, que hace posible practicar distintos tratamientos selvícolas sin que la producción se vea sensiblemente afectada.

Por todo ello, *Pinus radiata* logró ser introducido y popularizado en diversos países hasta conseguir ser, hoy en día, la especie de *Pinus* más extensamente cultivada a nivel mundial con aproximadamente unos 4,0 millones de hectáreas gracias sobre todo al incremento de repoblaciones realizadas con esta especie en Nueva Zelanda, Chile y Australia (Lavery y Mead, 1998; Sánchez, 2001; Espinosa y Muñoz, 2005). Los países que cuentan con la mayor superficie de esta conífera son

Australia, Chile, España, Nueva Zelanda y Sudáfrica (Figura 1.3), aunque existen otros con una pequeña pero significativa superficie como Kenia, Argentina y Uruguay (FAO, 2001). Por su importancia merece citarse en primer lugar a Nueva Zelanda, en su calidad de pionero, así como Chile, siendo ambos países los mayores productores mundiales de esta especie y los que mayor experiencia presentan en la selección genética de este pino, lo que ha supuesto el logro y puesta en práctica de la mejora en la producción, calidad y resistencia a enfermedades de *Pinus radiata* (Dans del Valle *et al.*, 1999). Se estima que la producción total mundial de esta conífera supera los 40 millones de m³ (Lavery y Mead, 1998).

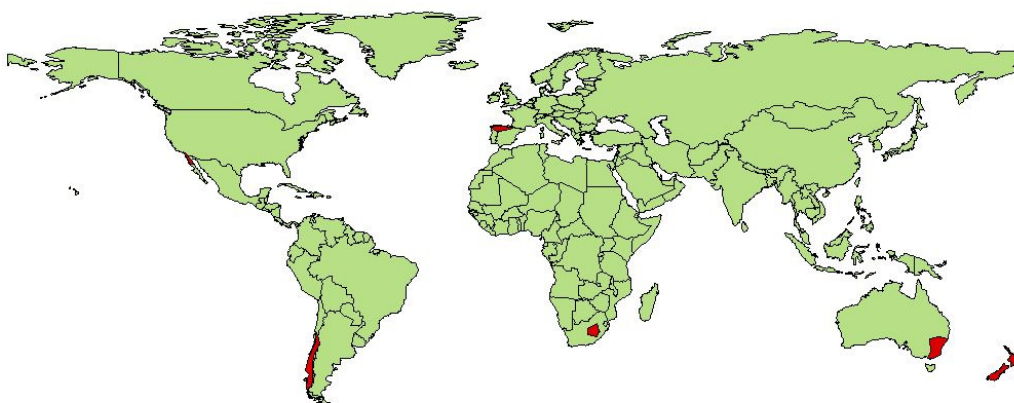


Figura 1.3. Distribución mundial de *Pinus radiata* D. Don. Fuente: Elaboración propia.

En Europa se ha ensayado su utilización para repoblación en Italia, Francia, España y Portugal. De todos ellos, España es el único país donde *Pinus radiata* ocupa grandes extensiones y en el que existen importantes industrias de transformación que consumen su madera (Castedo-Dorado, 2004). *Pinus radiata* fue introducido por primera vez en España a mediados del siglo XIX, a través del arboricultor vasco Mario Adán de Yarza, quien utilizó esta especie con carácter ornamental en 1857 en un jardín de su propiedad, siendo en 1871 cuando se realizó la primera parcela de experimentación en monte con esta especie, y más tarde, entre 1898 y 1925, llegó a plantar en sus montes 11 millones de coníferas, en su mayoría *Pinus radiata* (Michel-Rodríguez, 2003). Al cabo de unas décadas se confirmó el éxito de la especie, iniciándose con ello el camino hacia su expansión por toda la Cornisa Cantábrica, especialmente en el País Vasco (137.500 hectáreas) (CAE, 2005), Galicia (89.000 hectáreas) (DGCN, 2001; 2002 a;b;c), Asturias (20.000 hectáreas) (DGCN, 2003) y Cantabria (11.000 hectáreas) (DGCN, 2004). Esta conífera se encuentra representada también en Cataluña, Navarra y el norte de las provincias de Burgos y León, además de Canarias, en donde se han llevado a cabo algunas repoblaciones forestales de *Pinus radiata*, cubriendo así un total de aproximadamente el 2,1% de la superficie forestal española (García-Serna, 2011; Figura 1.4). De esta manera, hoy en día ha pasado a ser la conífera exótica más utilizada en repoblaciones en España, estando distribuida mayoritariamente en la

Cornisa Cantábrica, donde se ha adaptado perfectamente al clima (Crecente-Campo, 2008) y ocupa aproximadamente unas 260.000 hectáreas.

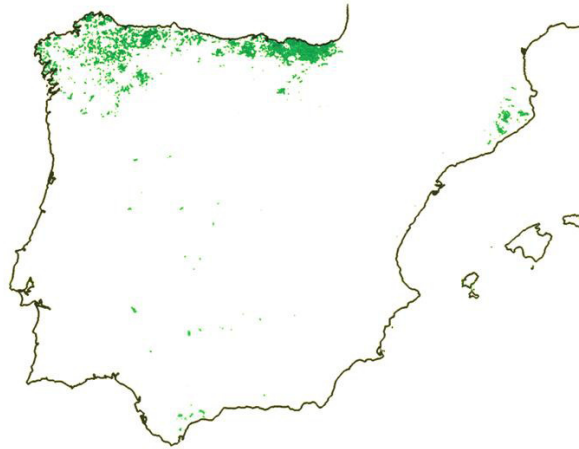


Figura 1.4. Distribución de *Pinus radiata* en España. Fuente: Ruiz de la Torre (2006).

Pinus radiata es una de las especies forestales con regiones de procedencia definidas por el método divisivo (Figura 1.5). La delimitación de estas regiones, denominadas Regiones de Identificación y Utilización del material forestal de reproducción (RIUs) (García del Barrio *et al.*, 2001), permite asignar una referencia de origen al material forestal de reproducción y, por tanto, posee el mismo valor que la región de procedencia para aquellas especies que no disponen de delimitación propia de regiones. Además, también facilita el realizar recomendaciones de uso acerca de cuál es la fuente de material forestal de reproducción más adecuada para los trabajos de reforestación (Valdés *et al.*, 2003).



Figura 1.5. Localización de las Regiones de Identificación y Utilización del material forestal de reproducción (RIUs) en España. Fuente: Alía *et al.* (2005).

1.2.1.2. Descripción y características de *Pinus pinaster*

Al igual que la especie anterior, *Pinus pinaster* Aiton pertenece a la subfamilia *Pinoideae* familia *Pinaceae*, que comprende 11 géneros y unas 250 especies. *Pinus pinaster* pertenece al orden *Pinales*, en la clase *Pinopsida* y dentro de la división *Pinophyta*. Esta especie de distribución mediterránea está presente de forma natural en una gran parte de la Península Ibérica. Hasta finales de la década de los noventa, *Pinus pinaster* se clasificaba en dos subespecies, aunque recientemente se ha realizado una caracterización, a partir de un amplio rango de poblaciones naturales, mediante marcadores moleculares para evaluar la diversidad genética de esta especie. La información obtenida mediante isoenzimas, microsatélites marcadores cloroplastídicos (cpSSRs) y nucleares (nuSSRs) y AFLPs (“*amplified fragment length polymorphisms*”), ha permitido establecer desde un punto de vista filogenético tres líneas maternas que cubren la distribución de esta especie: (1) la región oeste que incluye la mayoría de la Península Ibérica y Francia continental; (2) la región este que incluye el sudoeste de Francia, Córcega, Italia, Túnez y Argelia; y (3) la región Marroquí restringida a Marruecos (González-Martínez *et al.*, 2004).

Este pino se conoce comúnmente con los nombres de “pino del país”, “pino marítimo”, “pino bravo”, “pino negral” o “pino rodeno”. En la zona continental de la Península Ibérica ha sido muy frecuente su utilización como productor de resina, recibiendo por ello el nombre popular de “pino resinero”.

El árbol presenta una copa más piramidal cuando es joven, adquiriendo una forma más redondeada y reduciéndose su longitud al tercio superior de la altura total del árbol en edades avanzadas. En edades jóvenes su corteza es áspera y negruzca, formándose en la madurez un ritidoma grueso y agrietado que se desprende con facilidad mostrando en su interior tonos rojizos. Suele alcanzar alturas de 20 a 30 metros, aunque en condiciones excepcionales se han medido pinos que rondan los 40 metros. Las acículas, gruesas y largas (12-22 cm), se encuentran siempre envainadas en grupos de dos y presentan un color verde oscuro (Rodríguez *et al.*, 2007). Posee piñas grandes (12-20 cm), casi simétricas, con forma cónica y pedúnculo muy corto. Éstas, tienen carácter cerrotino, pudiendo permanecer adheridas al árbol durante varios años antes de abrirse y, en ocasiones, resulta frecuente la presencia de gotas de resina seca, especialmente sobre las escamas de la parte trasera y más expuesta al sol (Figura 1.6).

Se trata de un pino enormemente frugal, capaz de vivir y crecer sobre suelos muy someros, arenosos y poco fértiles, donde otras especies no serían una alternativa productiva. Se desarrolla bien sobre terrenos sueltos, silíceos, pizarrosos o graníticos, de espesor superior a los 15 cm y libres de encharcamiento. Resiste bien la sequía estival y el frío, lo que permite usar esta conífera en repoblaciones a altitudes limitantes para otras especies. A partir de los 900 metros de altitud se

desaconseja su utilización por los problemas que le causan las nevadas, siendo óptimos para esta especie los terrenos situados en cotas inferiores a los 400 metros (Pérez y Vázquez, 1994; Rodríguez-Soalleiro *et al.*, 1997; Rodríguez *et al.*, 2007).



Figura 1.6. Porte juvenil y adulto, y acículas, de *Pinus pinaster* Ait. Fuente: Adaptado de Rodríguez *et al.* (2007).

Su madera es resinosa, con grano medio-basto y textura media. Las trozas correspondientes al tercio inferior del árbol suelen ser derechas, algo cónicas, acusando con abundante regularidad tableadura y corazón excéntrico, resultado del fuste torcido que suele presentar esta especie. El resto de las trozas, correspondientes a los tercios medio y superior, suelen ser torcidas y cónicas (Vignote *et al.*, 2000). Esta falta de rectitud suele estar originada por un crecimiento desigual en diámetro y por la presencia de madera de compresión en gran parte del tronco. La fibra suele ser recta aunque continuamente interrumpida como consecuencia de la presencia de nudos y otros defectos (Rodríguez-Soalleiro *et al.*, 1997; Vignote *et al.*, 2000).

Los defectos más comunes en la madera de esta especie, son: los nudos (agrupados en verticilos), las bolsas de resina, la madera de compresión asociada a la escasa rectitud del fuste, y el azulado de la albura (Vignote *et al.*, 2000). Algunos de ellos, como la falta de rectitud o la nudosidad, pueden corregirse, en cierta medida, utilizando planta mejorada genéticamente y/o técnicas selvícolas específicas (Sanz *et al.*, 2006), principalmente podas y claras.

La madera de *Pinus pinaster* es relativamente fácil de secar. Los ciclos de secado convencionales que requiere son bastante cortos. Existen diversos métodos de secado que van desde el secado natural al artificial y en los últimos años incluso se han desarrollado cámaras de secado de alta temperatura (115-130°C) que permiten reducir drásticamente el tiempo de secado en las coníferas (en el caso del pino marítimo se llega a reducir el ciclo entre 2,5 y 3 veces) (Sanz *et al.*, 2006).

En general, la madera de mejor calidad de esta especie podrá ser empleada en la fabricación de piezas para muebles, carpintería de revestimientos o como elemento estructural, mientras que las aplicaciones de la madera de peor calidad serán la industria de tableros de partículas, tableros de fibras o pasta de papel. Este pino presenta una gran oferta de productos desarrollados a partir de su madera, aunque su destino final siempre depende mayoritariamente de las industrias locales que la transforman. En este sentido, las diferencias son muy notables, destacando la importancia del sector mobiliario y carpintería en Portugal y la fabricación de pasta y productos cepillados en Aquitania. En el noroeste español, por el contrario, la mayor parte de la producción corresponde a tabla y tablón para construcción (desempeñando labores auxiliares como encofrado, andamiajes y cierres) así como madera destinada a la fabricación de palet, embalaje y envase alimentario. Las mejores calidades se destinan a carpintería y mueble (Sanz *et al.*, 2006).

Para su utilización como madera maciza, la presencia de defectos va a limitar su empleo en los destinos industriales más exigentes como el desenrollo o la chapa. Para otros usos industriales, como el aserrado, debe ser la propia industria la que tendrá que adaptarse y realizar despieces especiales para evitar los defectos y poder obtener así el mayor rendimiento de acuerdo con las dimensiones más demandadas por el mercado (Vignote *et al.*, 2000).

De acuerdo con lo anterior, las industrias con restricciones tecnológicas más estrictas (diámetros mínimos en punta delgada de 35 cm, ausencia de médula excéntrica, nudos y azulado, rectitud de la troza, etc.), como es el caso de las fábricas de chapa y desenrollo, utilizan la madera de *Pinus pinaster* de forma puntual. Esto ocurre principalmente por el hecho de que son escasas las trozas de esta especie que cumplen esas condiciones de calidad. Además, en ocasiones, los problemas de resina de este pino hacen desaconsejable su utilización para tableros contrachapados. En cambio, la belleza de la veta de su madera está muy cotizada para la obtención de chapa a la plana destinada al revestimiento de tableros, pero solo las mejores rollas cumplirán los requisitos necesarios para este uso industrial (Vignote *et al.*, 2000).

El precio pagado por la madera de desenrollo llega a ser el doble o el triple del obtenido con la mejor calidad de la madera de aserrado (Rodríguez-Soalleiro *et al.*, 1997) y es por ello que resulta de gran interés la obtención de un producto de mejor

calidad, mediante la aplicación de una selvicultura adecuada, de cara a revalorizar la madera de esta especie para acceder a los destinos de mayor valor.

Las industrias de tableros, a diferencia de las anteriores, consumen una parte importante de madera de esta especie, pero el precio pagado por ella es inferior. Lógicamente, los requerimientos tecnológicos de la materia prima en estas industrias son menores, centrandó su mercado en la madera de escasa dimensión (Rodríguez-Soalleiro *et al.*, 1997). La gama de productos fabricados incluye el tablero aglomerado, el tablero MDF, el tablero de fibras duro, y el tablero contrachapado. En la actualidad existe una tendencia hacia la integración vertical de procesos de transformación como el recubrimiento con melamina, los rechapados o la fabricación de productos derivados como suelos laminados o postformados.

1.2.1.2.1. Distribución y expansión de *Pinus pinaster*

Pinus pinaster es una conífera natural de la región mediterránea occidental y de la fachada atlántica que constituye masas forestales en Francia, España, Portugal, Italia, Marruecos, Argelia y Túnez (Figura 1.7). A nivel mundial, se estima que ocupa una superficie aproximada de 4,4 millones de hectáreas, de las cuales 4,2 millones se disponen en su área de distribución natural. Por su parte, 200.000 hectáreas se sitúan en otras áreas de reforestación, en países como Australia, África del Sur, Nueva Zelanda, Chile, Argentina y Uruguay (Sanz *et al.*, 2006).

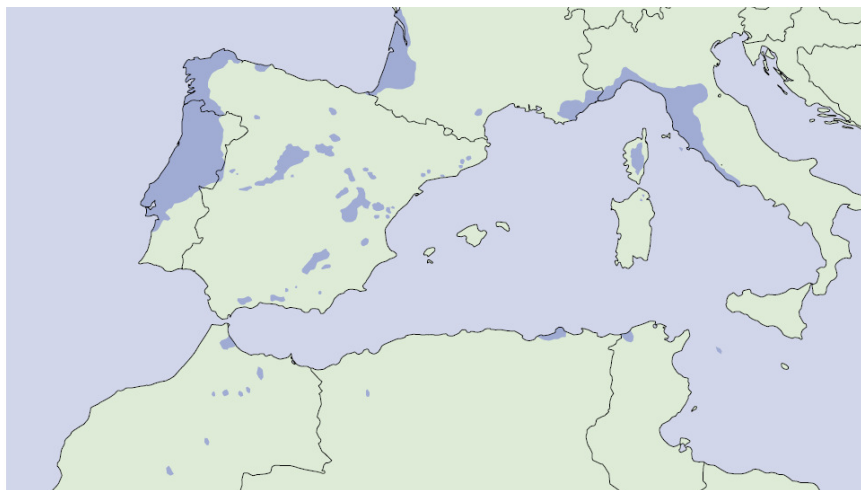


Figura 1.7. Distribución natural de *Pinus Pinaster* Ait. Fuente: Alía y Martín (2003).

Este pino ha sido ampliamente utilizado en programas de reforestación y de mejora en diversos países, entre los que destacan España, Francia, Portugal y Australia, existiendo actualmente un gran interés en la conservación de los recursos genéticos de algunas de sus poblaciones (Alía *et al.*, 2001).

En España, ha estado presente desde la última fase del Holoceno, tal y como observaron Alcalde-Olivares *et al.* (2004) mediante el estudio de restos fósiles de

Pinus pinaster. Desde entonces y hasta nuestros días, se han ido conformando extensos pinares con nítido carácter espontáneo que han llegado a alcanzar actualmente más de 1 millón de hectáreas (40% de las masas de origen natural) (González-Martínez, 2002), además de las masas procedentes de las repoblaciones realizadas con este pino (DGCN, 2003).

La importancia de *Pinus pinaster* en nuestro país se ha visto reflejada también en el estudio detallado sobre el comportamiento de sus poblaciones (p.e. Alía *et al.*, 1995; 2001), en el que se han analizado principalmente aspectos relacionados con su crecimiento, resistencia a factores ambientales y variabilidad geográfica. Fruto de ello, se han identificado diferentes regiones de procedencia, correspondientes con masas de características ecológicas y genéticas similares, que han facilitado la gestión y el estudio del material forestal de reproducción de la especie en la Península Ibérica (Martín-Albertos *et al.*, 1998) (Figura 1.8).

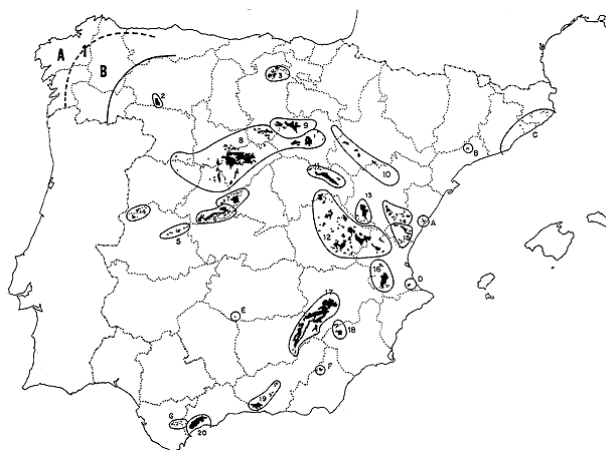


Figura 1.8. Localización de las regiones de procedencia de *Pinus pinaster* Ait. en España. Fuente: Alía *et al.* (1996).

1.2.1.3. Situación forestal de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* en Asturias

Potencialmente la práctica totalidad del territorio asturiano (10.600 km²) es capaz de soportar cubiertas arboladas, pero solo el 40% corresponde a monte arbolado y material leñoso. El área de distribución de las distintas especies forestales que han conformado esa cubierta vegetal ha ido variando constantemente a lo largo de la Historia. Uno de los motivos principales de este hecho ha sido la propia actuación del hombre (Valdés *et al.*, 2003). Tal es el caso de la evolución de la distribución de *Pinus pinaster*, que apareció en la zona costera de la provincia por primera vez en el siglo XVIII, atribuyéndose su existencia a su introducción desde Galicia, y que gracias a su utilización por parte del hombre ha logrado asentarse con éxito en el litoral asturiano (Sendín, 1996).

Fue a partir del siglo XX cuando los cambios sociales y las nuevas demandas económicas del desarrollo industrial, unido a la deforestación secular y la alta demanda de maderas, impulsaron una producción forestal intensiva, con una política generalizada de repoblaciones forestales, en donde se utilizaron especies de aprovechamiento económico rápido y rentable, principalmente *Pinus radiata*, *Pinus pinaster* y *Eucalyptus* spp. La actuación repobladora llevada a cabo en la segunda mitad del siglo XX explica la existencia de gran parte de los pinares de la provincia, en su mayoría formados por *Pinus radiata* y *Pinus pinaster*. Esto se puede ver reflejado en los datos del Primer Inventario Forestal Nacional (IFN1) (ICONA, 1973), en donde se muestra que las principales especies utilizadas en las repoblaciones sumaban en esa época más de 114.000 ha, conformadas por 26.027 ha de *Pinus radiata* y 44.855 ha de *Pinus pinaster* (Valdés *et al.*, 2003).

La implantación de una planta de producción de celulosa en la región asturiana (CEASA), la cual inicialmente consumía 300.000 m³ de eucalipto y 100.000 m³ de pino, condicionaba en la década de los 70 el interés por estas especies. Sin embargo, la reconversión a producción exclusiva de pasta de celulosa de *Eucalyptus globulus* Labill., así como los convenios facilitados para la gestión de montes, ofreciendo un material forestal mejorado para la maximización de la producción y un menor turno de corta, despertó el interés de muchos de los propietarios particulares del litoral asturiano, que optaron por sustituir, en muchos casos, sus plantaciones de *Pinus pinaster* por *Eucalyptus globulus*. Otro de los aspectos que ha influido en la distribución de estas coníferas en la provincia asturiana ha sido el abandono del medio rural con liquidación de las existencias en el monte (corta del vuelo).

A pesar de todo esto, *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* siguen siendo actualmente las coníferas de mayor interés, y las más importantes económicamente en la Comunidad Autónoma y en el resto del noroeste atlántico (Valdés *et al.*, 2003), pero la falta de una gestión selvícola adecuada para estas especies, desde un punto de vista productivo y como medida de prevención de plagas, enfermedades e incendios, ha hecho que hoy en día la productividad de ambas coníferas se encuentre muy por debajo de su potencial, con el agravante de que un alto porcentaje de los incendios de la región se hayan estado produciendo en masas conformadas por dichas especies.

Todos estos motivos apuntados han frenado el ritmo de repoblación que se estaba llevando a cabo con estas coníferas en los últimos años, principalmente para *Pinus pinaster*. Así, los datos recogidos en el Primer Inventario Forestal Nacional (IFN1) (ICONA, 1973) y el Tercer Inventario Forestal Nacional (IFN3) (DGCN, 2003), confirman el descenso significativo de la nueva superficie repoblada por estas especies en la provincia asturiana, especialmente para *Pinus pinaster*, y en menor medida para *Pinus radiata*.

Dada la capacidad productiva del territorio asturiano, la importancia que han tenido y siguen teniendo estas especies en la región, la superficie que ocupan actualmente y el impulso que recibirán de acuerdo con las previsiones del Plan Forestal de Asturias (Gobierno del Principado de Asturias, 2001), diversos organismos públicos vieron la necesidad de promover una línea de investigación centrada en la mejora de la gestión forestal de las masas de coníferas del arco atlántico. Así, el Servicio Regional de Investigación y Desarrollo Agroalimentario del Principado de Asturias (SERIDA), en coordinación con la Dirección General de Política Forestal del Principado de Asturias y la Universidad de Santiago de Compostela, por medio de la Unidad de Gestión Forestal Sostenible (UXFS, término en gallego “*Unidade de Xestión Forestal Sostible*”), instalaron en el invierno 2005-2006 una red de parcelas permanentes, dentro del área de distribución de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* en Asturias, con el fin de realizar estudios relacionados con la silvicultura como herramienta de trabajo para mejorar la calidad y sanidad de las masas, prevenir la incidencia de incendios forestales y maximizar la producción de las mismas.

1.2.1.3.1. *Pinus radiata* D. Don en Asturias

No ofrece discusión alguna el origen exótico de *Pinus radiata*, introducido en Asturias, como se ha visto anteriormente, hace algo más de medio siglo. En la actualidad, cuenta con una gran aceptación, principalmente por sus buenas características productivas, que permiten obtener rendimientos económicos satisfactorios, que pueden verse incrementados de forma notable con una adecuada gestión (Rodríguez *et al.*, 2007). Así, este pino comenzó a ser utilizado por el Patrimonio Forestal del Estado en repoblaciones desde los años 40 del siglo XX con criterios eminentemente productores para el aprovechamiento de su madera. La enorme difusión de esta especie se debe fundamentalmente a la reforestación de propietarios particulares. El abandono de prácticas tradicionales así como la rentabilidad obtenida por el rápido crecimiento de la especie han favorecido su cultivo forestal en terrenos anteriormente dedicados a la ganadería y agricultura (Valdés *et al.*, 2003).

La superficie poblada por *Pinus radiata* en Asturias, desde la realización del IFN1 (ICONA, 1973) hasta el IFN3 (DGCN, 2003), mostró un descenso importante, pasando de estar presente como formación forestal dominante en el 12% de la superficie arbolada de la provincia, a ocupar cerca del 4,5% de esa superficie. Concretamente, atendiendo a la base de datos del Tercer Inventario Forestal Nacional (IFN3) (DGCN, 2003), *Pinus radiata* se encuentra representado como formación forestal dominante, solo o acompañado por otras especies, para una ocupación superior al 20% de fracción de cabida cubierta, en 20.268 ha.

La superficie actual ocupada por esta conífera en Asturias se encuentra principalmente en los valles interiores de la provincia, en donde el clima se caracteriza por una reducida presencia e intensidad de heladas (hecho que impone restricciones al crecimiento de esta especie). En todo caso, la extensión de *Pinus radiata* en la región (Figura 1.9) ha sido inferior a la de *Pinus pinaster*, localizándose principalmente en pequeñas plantaciones, sobre todo en el área occidental y central de Asturias (Montes, 1990).

Según el IFN3 (DGCN, 2003), el número de pies menores asciende a 3.573.713, el de pies mayores a 8.267.369, el volumen total con corteza de estos últimos a 2.276.866 m³ y su crecimiento anual medio a 252.455 m³.

Cabe resaltar que en el Plan Forestal del Principado de Asturias (Gobierno del Principado de Asturias, 2001) se prevé un incremento hasta alcanzar 56.000 ha de masas puras en un plazo de 60 años, lo que supone multiplicar por tres la superficie actual, dando una idea de la importancia creciente que va a tener la especie dentro del sector forestal asturiano a corto y medio plazo.

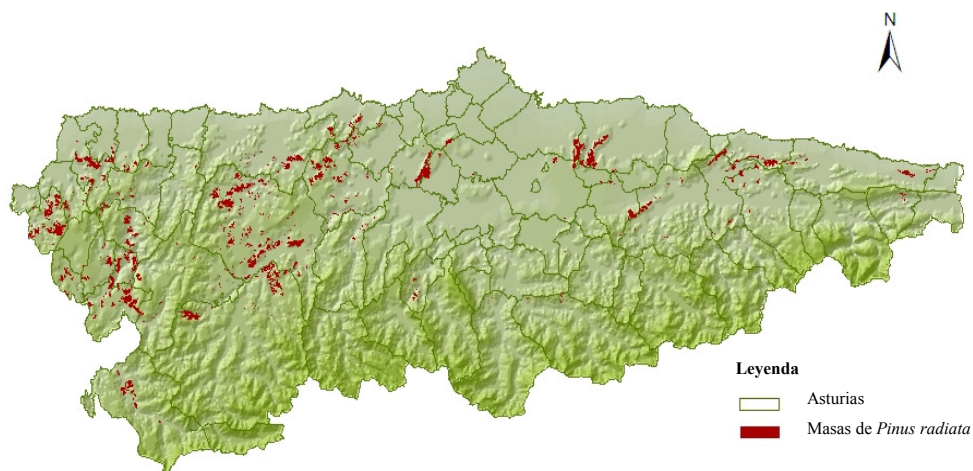


Figura 1.9. Distribución de las masas de *Pinus radiata* D. Don en Asturias, considerando teselas en las que aparece como especie dominante. Fuente: Elaboración propia a partir del Mapa Forestal de España 1:50.000 (MIMAM, 2003).

1.2.1.3.2. *Pinus pinaster* Aiton en Asturias

Históricamente, el pino más abundante en la provincia ha sido *Pinus pinaster*, con una extensión próxima al 40% de la superficie total ocupada por coníferas (Rodríguez *et al.*, 2007). Sus masas se engloban dentro de la región de procedencia “noroeste” y, dentro de ella, en las subregiones “noroeste costera” y “noroeste interior” (Martín-Albertos *et al.*, 1998) (En la Figura 1.8, 1A y 1B, respectivamente).

Es una especie que ha sido empleada en repoblación desde el siglo XVIII. Su capacidad para desarrollarse y crecer en suelos someros y poco profundos la

convierten en una alternativa muy interesante, tanto para fines productivos como protectores, donde otras especies no prosperarían. La rusticidad de este pino permite además su utilización en cotas superiores a las de *Pinus radiata*, tolerando mejor el frío y pudiendo llegar hasta los 900 metros de altitud. Todo ello ha hecho que esta conífera haya sido una de las más empleadas en la provincia asturiana desde antaño, ocupando además de forma natural una gran superficie.

A pesar de que *Pinus pinaster* llegó a representar el 20% de la superficie forestal, de acuerdo con el IFN1 (ICONA, 1973), como se comentó anteriormente, factores como el abandono del medio rural, el empleo de *Eucalyptus globulus* como especie alternativa en muchos de los montes particulares de la zona costera, así como la ocurrencia de incendios forestales, han sido determinantes en la reducción de la superficie ocupada por *Pinus pinaster* en la región. Así, de acuerdo con la base de datos del Tercer Inventario Forestal Nacional (IFN3) (DGCN, 2003), *Pinus pinaster* está presente como formación forestal dominante, solo o acompañado por otras especies, para una ocupación superior al 20% de fracción de cabida cubierta, en 25.553 ha, (aproximadamente el 5,7% del total de la superficie arbolada de la provincia) (Figura 1.10), cifra bastante inferior a la registrada en años anteriores. Esta superficie se encuentra localizada principalmente en áreas térmicas y húmedas de las zonas litoral y de los valles del Centro y Occidente de Asturias (Montes, 1990).

La información recogida en el IFN3 (DGCN, 2003) indica que el número de pies menores asciende a 5.131.306, el de pies mayores asciende a 8.125.399, el volumen total con corteza de estos últimos a 2.340.631 m³ y el incremento medio anual a 199.332 m³.

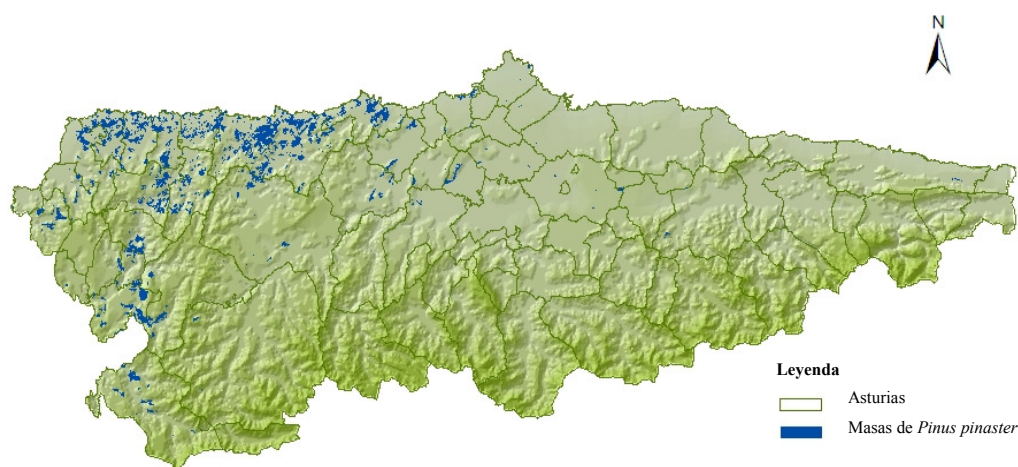


Figura 1.10. Distribución de las masas de *Pinus pinaster* Ait. en Asturias, considerando teselas en las que aparece como especie dominante. Fuente: Elaboración propia a partir del Mapa Forestal de España 1:50.000 (MIMAM, 2003).

Por otro lado, cabe esperar la futura ampliación de estas cifras de acuerdo con el Plan Forestal de Asturias (Gobierno del Principado de Asturias, 2001) que marca como uno de sus objetivos duplicar la superficie de *Pinus pinaster* a lo largo de un horizonte temporal de 60 años (Rodríguez *et al.*, 2007).

1.2.1.4. Condicionantes bióticos: situación sanitaria de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* en Asturias

Un aspecto de gran importancia en las masas forestales, y que se encuentra relacionado en gran medida con la gestión de las mismas, es el aspecto sanitario. En este apartado se presentan de forma general las principales plagas y enfermedades que afectan a *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* dentro del ámbito atlántico. Además, se comentan algunas de las plagas y enfermedades que están suponiendo en los últimos años una amenaza para las masas forestales formadas por estas coníferas.

En primer lugar, es importante destacar que la gestión forestal va a jugar un papel clave en la sanidad de las masas. Una correcta gestión para asegurar la buena salud de un sistema forestal debe ser un proceso continuo de prevención y control desde la semilla hasta el aprovechamiento final de sus productos. Para ello, es necesario llevar a cabo una adecuada selección de la planta, del lugar de instalación de la masa y de la selvicultura a aplicar. En este último caso, podar sin ocasionar heridas importantes y en el momento adecuado, desinfectar las herramientas de poda o retirar los restos del monte tras la corta o poda si éstos están afectados por algún patógeno, o si los restos son susceptibles de ser colonizados por insectos, serían ejemplos de buenas prácticas selvícolas. Asimismo, se debe llevar a cabo el saneamiento de la masa eliminando aquellos árboles afectados por alguna patología. Las malas prácticas o las decisiones equivocadas pueden perjudicar la salud de las masas forestales.

El hecho de que la especie sea autóctona, como es el caso de *Pinus pinaster*, o se trate de una especie introducida, como *Pinus radiata*, es un factor clave en la sanidad forestal, especialmente cuando en el área de introducción existen congéneres de la especie introducida y corre el riesgo de ser reconocida por los organismos dañinos de la zona (Lombardero *et al.*, 2008). En general, las especies autóctonas suelen ser fácilmente reconocibles por los insectos y patógenos que la rodean, aunque, como ventaja, suelen estar dotadas de mecanismos de defensa que les permiten repeler o tolerar los daños, de manera que éstos tienden a producirse sólo cuando la especie está creciendo en condiciones subóptimas, resultando los individuos más atractivos y vulnerables para los organismos dañinos. Por lo general, suelen ser las especies introducidas las que sufren un mayor daño debido a que no han coevolucionado con los organismos que las atacan en su nuevo rango de distribución y, por tanto, no han desarrollado mecanismos de defensa específicos

contra ellos (Strauss y Agrawal, 1999). Lombardero *et al.* (2008), trabajando con estas dos especies arbóreas en Galicia, observaron que el insecto nativo *Tomicus piniperda* (L.) prefiere a la especie nativa *Pinus pinaster* y, sin embargo, causa mayores daños en la especie introducida *Pinus radiata*. Este mismo estudio muestra además que el hongo *Sphaeropsis sapinea* (Fr.) Dyko et Sutton, en la zona estudiada, causaba daños únicamente en la especie introducida *Pinus radiata* y no en *Pinus pinaster*.

En general, en la provincia asturiana, *Pinus pinaster* presenta una fortaleza, rusticidad y adaptación a las condiciones estacionales que lo hacen más resistente a plagas y enfermedades que *Pinus radiata*.

La plaga más común en el arco atlántico es la procesionaria del pino (*Thaumetopoea pityocampa*), estando también presentes en las masas, con menor frecuencia, otros insectos como *Tomicus* spp., *Hylobius abietis*, *Pissodes castaneus*, *Ips sexdentatus* y *Rhyacionia buoliana*. La procesionaria del pino es la plaga más característica y conocida del pino, siendo la más frecuente para *Pinus radiata* en Asturias, mientras que *Pinus pinaster* se ve menos afectado. Las orugas de esta mariposa son voraces comedoras de las acículas de pino, pudiendo causar importantes daños y defoliaciones masivas, especialmente cuando se trata de repoblaciones jóvenes.

Existen otros insectos con hábitos de vida perforadores, que atacan las partes leñosas (tronco, ramas y ramillas) y excavan galerías en el floema, causando la muerte de la planta o de las ramas. En Asturias, los más habituales son los escolítidos, en particular el barrenillo del pino (*Tomicus* spp.), que ataca los brotes terminales de los árboles adultos causando una reducción del crecimiento, y que en su fase reproductiva ataca, en general, a árboles debilitados a los que les causa la muerte. Algunas masas de pino, se han visto atacadas también por otra especie de escolítido, *Ips sexdentatus*, coleóptero cuya presencia está muy relacionada con la madera apilada en monte o la presencia de árboles quemados o caídos (muy susceptibles de ser atacados), pudiendo llegar a producir la muerte de árboles sanos. Entre los perforadores destaca también el gorgojo del pino (*Pissodes castaneus*), que puede ocasionar daños en repoblados jóvenes, aunque lo normal es que ataque a las plantas debilitadas. Otro perforador, en este caso de yemas, que también puede afectar a estas coníferas, es *Rhyacionia buoliana*, mariposa que en su fase larvaria penetra en las yemas terminales y laterales del pino, destruyéndolas y produciendo fuertes deformaciones o bifurcaciones del tronco. Los daños son más importantes en *Pinus radiata* y de menor incidencia en *Pinus pinaster*. Finalmente, el descortezador *Hylobius abietis* causa daños principalmente en repoblaciones jóvenes de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* cuando éstas se realizan en una zona donde previamente se hizo una corta a hecho. Este insecto mordisquea la corteza y el floema de plantas

jóvenes llegando a causar un anillamiento de los tallos y por tanto la muerte de la planta.

En cuanto a las enfermedades cabe destacar la enfermedad de la mancha marrón de las acículas del pino, provocada por *Mycosphaerella dearnessii*. Potencialmente todas las especies de pinos son huéspedes, siendo los más susceptibles *Pinus palustris* Mill., *Pinus radiata*, *Pinus attenuata* Lemmon, *Pinus sylvestris* L. y *Pinus ponderosa* (Dougl. Ex Laws). Este patógeno también está descrito sobre *Pinus halepensis* Mill., *Pinus pinaster* y *Pinus uncinata* Mill., pero sus ataques no suelen ser graves. Los síntomas de *M. dearnessii* aparecen sobre acículas viejas (con más de un año) en forma de manchas amarillas que más tarde se vuelven marrón oscuras y caen prematuramente. La defoliación causada por este hongo suele tener menos impacto que la provocada por *Mycosphaerella pini* (conocida comúnmente como banda roja), que provoca la defoliación de los verticilos basales del árbol (en acículas viejas y nuevas), pudiendo llegar a causar la muerte del árbol en los ataques más intensos y reiterados. Este hongo ataca a varias especies de pino especialmente *Pinus radiata*, que es muy susceptible a la enfermedad. También, pino laricio (*Pinus nigra* var. *salzmannii*), *Pinus mugo* Turra y *Pinus ponderosa*. *Pinus pinaster*, sin embargo, parece no ser muy susceptible.

La gestión selvícola puede presentar varios efectos sobre los niveles de enfermedades de hongos criptogámicos que afectan a acículas. Generalmente tras el proceso de clara, con o sin poda, las masas que se abren presentan una mayor circulación de aire y el follaje se seca a un ritmo más rápido que en una masa con mayor densidad. Esta reducción de los períodos de humedad en las acículas generalmente disminuye la tasa de infección. La disminución de densidad aumenta la distancia entre los árboles y esto reduce también la eficacia de la diseminación de esporas por lluvia, la mayoría de las cuales pueden viajar sólo a cortas distancias. Además, los árboles pequeños que se retiran del monte respecto a los árboles de porvenir, suelen ser más susceptibles, lo que reduce la cantidad de inóculo disponible para continuar con el proceso de infección. La eliminación de los árboles susceptibles reduce por tanto el impacto de la enfermedad en el volumen total del rodal. Por otro lado, la poda de los verticilos infectados elimina y reduce el inóculo disponible para iniciar una nueva infección. Generalmente las acículas que caen al suelo tras la poda, rápidamente son colonizadas por otros hongos, permaneciendo las acículas con un corto período de tiempo para producir esporas después de la poda, disminuyendo además la probabilidad de infección desde el suelo a los primeros verticilos que permanecen tras la poda (Bulman *et al.*, 2004).

Sin embargo, desde hace unos años, los pinares del arco atlántico se enfrentan a dos grandes y nuevas amenazas: el hongo *Fusarium circinatum*, que causa la enfermedad de cuarentena del chancro resinoso en troncos y ramas, y el temido

nematodo del pino *Bursaphelenchus xylophilus* (Steiner et Buhrer) Nickle et al., plaga cuarentenaria que también resulta letal para los árboles.

Fusarium circinatum apareció en España en 1994 (Landeras *et al.*, 2005) y se ha constatado la existencia de focos, con distinta facilidad para su erradicación, en toda la Cornisa Cantábrica (Pérez-Sierra *et al.*, 2007). Es un hongo patógeno de diferentes especies de pino, fundamentalmente *Pinus radiata*, *Pinus sylvestris*, *Pinus pinaster*, *Pinus pinea* y *Pinus canariensis*.

La enfermedad del chancro resinoso fue descrita por primera vez en 1946, en Carolina del Norte (Estados Unidos). Después se extendió a otros lugares de Norteamérica y fue introducida a otros países, entre ellos España. En el País Vasco apareció en algunos viveros a mediados de los noventa y en 2004 también fue encontrado en las provincias de Asturias y Galicia (Landeras *et al.*, 2005; Xunta Galicia, 2008). Como consecuencia del reconocimiento oficial de la presencia del hongo en la Península, el Ministerio de Medio Ambiente decidió reforzar las medidas de control. Se trata de una enfermedad de cuarentena y, por tanto, de declaración obligatoria en la Unión Europea. Así lo establece la Directiva 2000/29/CE que se incorporó a la legislación española y que obliga además a iniciar programas de erradicación y control establecidos por ley en 2006 (Real Decreto 637/2006). Esta especie ha mostrado una gran virulencia contra *Pinus radiata* en USA, y en España se ha verificado que afecta con una menor sintomatología a otras especies como *Pinus pinaster* y *Pinus sylvestris*, aunque se desconoce todavía su incidencia.

Se extiende con gran facilidad mediante la dispersión de las esporas o a través de la semilla, lo cual provoca unas medidas de control muy severas cuando se localiza un ejemplar afectado en el monte. En árboles adultos, los síntomas iniciales de la enfermedad son usualmente la muerte de la punta de los brotes en la parte superior de la copa como resultado de una infección próxima al punto de crecimiento. Las acículas situadas en el extremo de las ramas infectadas muestran un color amarillo rojizo, y finalmente caen, dejando el extremo de la rama desnudo. En el punto de infección en la rama suelen aparecer exudados de resina como respuesta al ataque del patógeno. Las piñas pueden abortar una vez alcanzado su tamaño final o antes, pero normalmente permanecen cerradas en verticilos infectados en el árbol produciéndose el deterioro de las semillas. Los síntomas más avanzados de la enfermedad consisten en la aparición de chancros resinosos en el tronco y ramas principales. La sintomatología puede ser confundida en ocasiones con el ataque de otros hongos, algunos ya descritos anteriormente.

En la Tabla 1.1 se citan un conjunto de síntomas de algunos de los principales hongos y plagas que pueden atacar a las masas de coníferas del ámbito atlántico.

Tabla 1.1. Síntomas comunes y específicos de los principales hongos y plagas que pueden atacar las masas de coníferas del noroeste de España.

Síntomas*	Agente causal			
	<i>Fusarium circinatum</i>	<i>Sphaeropsis sapinea</i>	<i>Tomicus piniperda</i>	<i>Ips sexdentatus</i>
Exudación de resina	XX	X		
Acículas de color pardo rojizo, decaimiento	XX	XX	X	X
Caída de acículas	XX	XX		
Aborto de piñas	XX	X		
Grumos resinosos			XX	XX

* X síntomas con frecuencia relativa, XX síntomas muy frecuentes. Fuente: Mansilla *et al.* (2005).

Preocupante es también la expansión del nematodo del pino (*Bursaphelenchus xylophilus* (Steiner et Buhrer) Nickle et al.), con un elevado riesgo para toda España, ya que no sólo existen las condiciones necesarias para el desarrollo de la enfermedad, sino las idóneas para la expresión epidémica de sus daños en determinadas áreas, agravándose tras la llegada del nematodo a Portugal. Que *B. xylophilus* haya destruido centenares de miles de hectáreas de pinos en Asia hace que sea la mayor amenaza para la conservación de nuestros montes de coníferas. Su introducción supondría gravísimos daños económicos tanto para la industria, ante las severas restricciones al comercio, como para los pinares, que verían minimizado el valor de la madera.

Se trata de un nematodo que se introduce en el árbol, destruyendo inicialmente los canales resiníferos de la planta, pasando de ahí al sistema vascular, obstruyendo la circulación de la savia y causando la muerte del árbol. Los principales hospedantes de la enfermedad son las especies del género *Pinus*, siendo *Pinus pinaster*, *Pinus sylvestris* y *Pinus nigra* Arn. altamente susceptibles (Evans *et al.*, 1996), mientras que *Pinus radiata* y *Pinus halepensis* presentan una sensibilidad intermedia y *Pinus pinea* L. parece ser más resistente. Esta enfermedad se denomina en España decaimiento súbito, seca de los pinos o nematodo de la madera del pino (NMP). Nativo de Norteamérica, el nematodo se introdujo a principios del siglo XX en Japón, generando pérdidas importantes. A finales de los 90 fue detectado por primera vez en Europa, sobre unas masas de *Pinus pinaster* ubicadas en Setúbal, Portugal, país que fue sometido a medidas de cuarentena en 1999 de acuerdo con el anexo II de la Directiva 2000/29/CE, que consolida la Directiva 77/93/CEE y sus modificaciones posteriores. La gravedad de la situación ha hecho que la Unión Europea haya adoptado una serie de Decisiones Comunitarias (Decisión 2006/133/CE de la Comisión de 13 de febrero de 2006 y sus modificaciones posteriores) para evitar su avance. Asimismo, las Comunidades Autónomas fronterizas con Portugal o limítrofes a las mismas, se han visto obligadas a realizar

prospecciones anuales del nematodo a partir de muestras de madera de pinares, aserraderos, industrias madereras y puntos de inspección de frontera (PIFs) (Fernández y Solla, 2006). Como resultado de estos muestreos, fue detectado un primer foco del NMP en el año 2008 en la provincia de Extremadura (Resolución 20/10/2008). Posteriormente, fue declarado un segundo foco del nematodo a finales del año 2010 en la provincia de Pontevedra (Resolución 17/11/2010), llevando al Gobierno gallego a establecer dos áreas de seguridad en torno al foco: en la primera zona (A), en donde ya se están realizando labores de erradicación de todas las especies arbóreas sensibles al nemátodo, tanto si están afectadas como si no, en un área de 1.500 metros alrededor del foco. En la segunda zona (B), de un radio de 20 kilómetros, se realizará una labor de eliminación de aquellos árboles susceptibles de ser atractivos del insecto vector *Monochamus*, dificultando su posible propagación. Por último, a principios del año 2012 ha sido declarado un nuevo foco del NMP en Extremadura, en donde la Administración ha elaborado un Plan de Acción en el que se establecen las medidas fitosanitarias necesarias para la erradicación y control del organismo nocivo (Resolución 17/02/2012).

Los resultados de las campañas de prospección en Asturias hasta el momento han sido negativos aunque la reciente introducción del nematodo en la zona noroeste peninsular ha agravado el riesgo de extensión de la enfermedad en las masas de coníferas asturianas.

En cualquier caso, independientemente de la plaga o enfermedad de la que se trate, es importante considerar que en muchas ocasiones la falta de gestión en los montes va a incrementar el riesgo sanitario, ya que los árboles resultan más vulnerables a los ataques de estos organismos patógenos. Una solución a este problema podría ser la elaboración de Planes Técnicos de Gestión en los que se recogiesen los aspectos necesarios para la gestión de las plagas y enfermedades que pudieran afectar a las diferentes especies forestales.

1.2.1.5. Condicionantes abióticos: los incendios forestales en masas de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* en Asturias

Factores abióticos como el viento, la nieve o el fuego pueden afectar a la persistencia de las masas forestales. De todos ellos, quizá el más importante para las masas de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* del noroeste de España sea el fuego. La mayoría de los incendios forestales que tienen lugar en esta parte del territorio español son una consecuencia de las propias características socioeconómicas y no tanto de las características climáticas de la zona.

La mayor incidencia de estos eventos en la provincia asturiana se ha registrado, fundamentalmente, en las décadas de los setenta y ochenta del siglo pasado con la presencia de años aislados de gran incidencia fuera de ese período. Esta época

coincide con el menor ritmo de actuaciones reforestadoras por parte de la Administración, en comparación con las grandes actuaciones de los años cincuenta. En estos años de transición política de la dictadura a la democracia con el traspaso de competencias administrativas a la autonomía asturiana, se produjo un contexto conflictivo en el medio rural que en ocasiones desembocó en incendios intencionados en los montes de la región (Valdés *et al.*, 2003).

En los últimos años, la situación de abandono progresivo del campo ha supuesto un aumento de la cantidad de biomasa acumulada en el monte, aumentando el riesgo de incendio y favoreciendo la ocurrencia o propagación de los mismos. A este hecho se unen factores de gran importancia en relación con estos eventos como son el mantenimiento del uso del fuego en muchas de las prácticas ganaderas y el desarrollo de determinados hábitos sociológicos, como el excursionismo, que repercuten en una mayor probabilidad de ocurrencia de estos desastres (Valdés *et al.*, 2003).

Todo ello ha favorecido una tendencia creciente en el número de incendios registrados en los últimos diez años en el Principado de Asturias. No obstante, el análisis de un período de tiempo mayor, muestra una cierta estabilización en el número de incendios tras la turbulenta década de los años noventa, en que la ocurrencia de estos eventos se mantenía en el orden de los 2.000 al año. El incremento del número de incendios de los últimos años se corresponde mayormente con el aumento sistemático de conatos (superficie inferior a 1 hectárea), siendo bastante constante el número de incendios medianos o grandes registrados en la región (Gobierno del Principado de Asturias, 2009).

De forma general, la superficie quemada presenta una tendencia relativamente constante, con un pequeño incremento de los incendios de superficies no arboladas y una clara reducción de los incendios de superficies arboladas. La superficie media afectada por incendio también presenta una tendencia decreciente en los últimos años, explicada en una parte importante por la mayor ocurrencia de conatos. Tal y como se observa en la Figura 1.11 (arriba), el año 2002, y en menor medida el 2006, estuvieron excepcionalmente marcados por una cantidad relativamente alta de incendios de mayor superficie.

Diferenciando por especies afectadas, en el período 2000-2009, las frondosas registraron una mayor superficie quemada que las coníferas. Las frondosas más afectadas fueron *Eucalyptus globulus* y *Castanea sativa* mientras que *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* fueron las coníferas con mayor superficie quemada (Figura 1.11 (medio y abajo)).

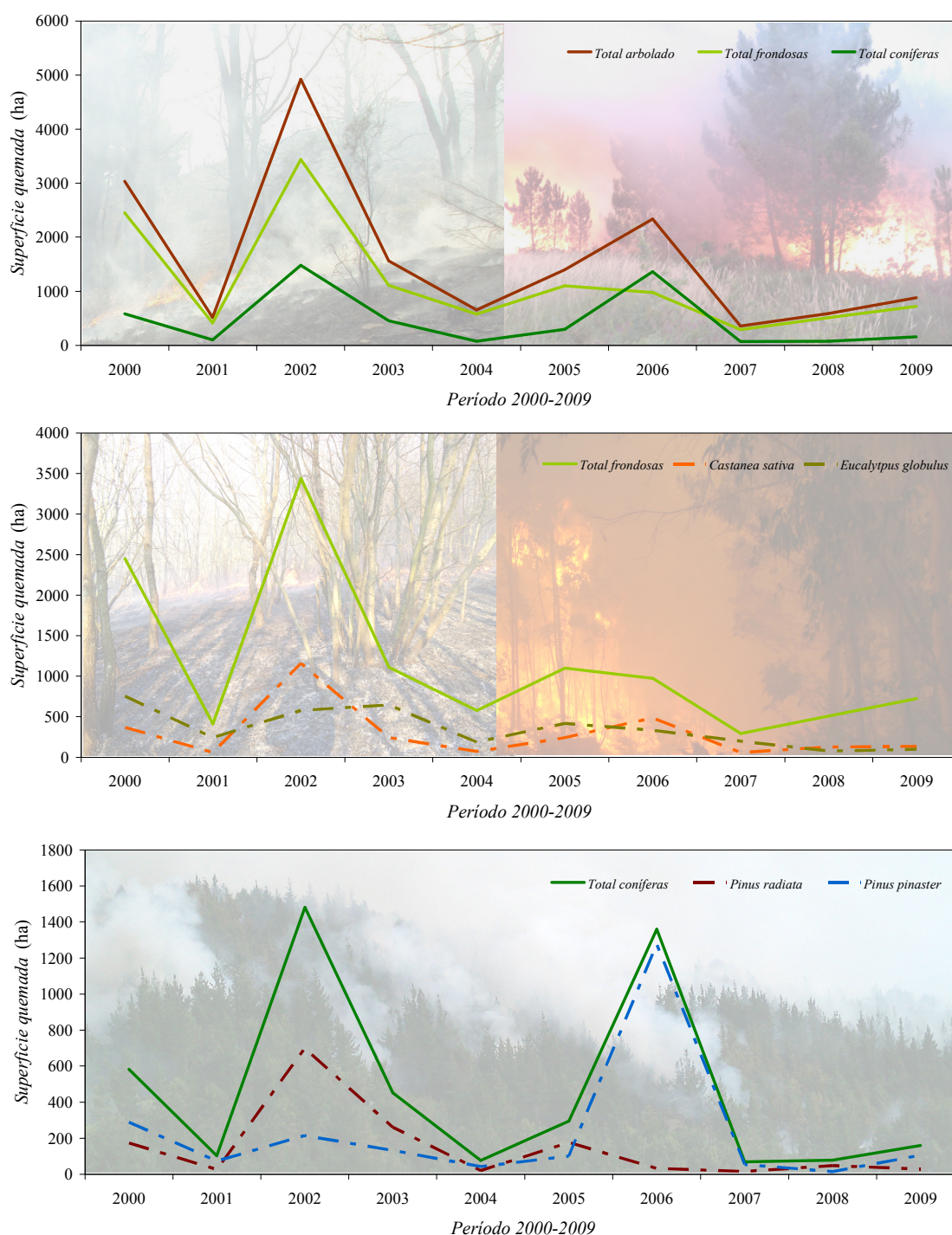


Figura 1.11. Distribución de la superficie arbolada quemada (período 2000-2009) en el Principado de Asturias para el total del arbolado, el total de especies de coníferas y el total de especies de frondosas (arriba); para las principales especies de frondosas (medio); y las principales especies de coníferas (abajo). Fuente: Bomberos de Asturias (comunicación personal, marzo 2011).

Es importante reseñar que siempre que se produce un gran incremento de superficie quemada (por ejemplo 2002 y 2006) se debe a la ocurrencia de grandes incendios forestales (GIF > 500 ha). La Tabla 1.2 muestra el número de GIF en cada

Comunidad Autónoma según el tamaño de la superficie afectada en el periodo 1970-2009 (Enriquez, 2010).

Todas las Comunidades Autónomas han padecido este tipo de incendios, aunque es en el noroeste peninsular y Castilla y León, donde, con un 44,34%, han ocurrido mayor número de siniestros que han afectado superficies comprendidas entre 500 y 1.000 hectáreas (Tabla 1.2).

En este contexto, disminuir el número de incendios y la ocurrencia de grandes incendios es sin duda uno de los principales objetivos que se deben establecer para evitar la amenaza que suponen los incendios forestales en las masas de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* del Principado de Asturias.

Tabla 1.2. Número de grandes incendios forestales (GIF) para cada Comunidad Autónoma, en función de la superficie afectada, en el período 1970-2009.

Comunidad Autónoma	Nº GIF 1970-2009				
	Superficie afectada (ha)				
	500-1.000	1.000-3.000	3.000-5.000	5.000-10.000	> 10.000
Andalucía	152	69	12	9	5
Aragón	30	17	3	3	1
Asturias	54	21	-	1	-
Canarias	6	17	4	1	2
Cantabria	13	2	-	-	-
Castilla La Mancha	54	41	1	1	3
Castilla y León	243	94	13	4	-
Cataluña	72	61	14	6	3
Comunidad Valenciana	100	86	17	9	8
Extremadura	117	61	7	4	-
Galicia	254	78	3	1	-
Islas Baleares	11	5	-	-	-
La Rioja	-	2	-	-	-
Madrid	8	6	-	-	-
Murcia	3	-	-	-	1
Navarra	-	2	-	-	-
País Vasco	4	3	-	-	-
Total GIF 1970-2009	1121	565	74	39	23

Fuente: Enriquez (2010).

De los diferentes tipos de incendios forestales existentes, los llamados fuegos de copa activos constituyen la mayor amenaza para la persistencia de las masas forestales (Peterson *et al.*, 2005) debido, tal y como apuntan Ruiz-González y Álvarez-González (2011), entre otros, a la mayor dificultad de extinción de estos incendios, el peligro que suponen para los medios humanos que los combaten y los graves daños medioambientales que provocan, con tasas de mortalidad del arbolado

cercanas al 100%. Esto ha generado un gran interés por poder evaluar el riesgo de que un incendio de superficie se transmita a las copas. Para facilitar la determinación de este riesgo y para el mayor entendimiento del comportamiento del fuego han sido desarrollados diversos modelos de simulación (ver ejemplos en Scott y Reindhart, 2001 y Cruz *et al.*, 2003b). Para ello, este tipo de modelos consideran los tres factores influyentes en un incendio forestal: combustibles, climatología y topografía del terreno. De todos ellos, tan solo los combustibles pueden ser modificados. Por este motivo, la manipulación de los mismos adquiere un papel principal en la prevención de incendios. Según Fernández-Manso y Sarmiento-Maillo (2004), la gestión del matorral y los restos de corta, así como el mantenimiento de una cubierta de copas adecuada son algunas de las actuaciones preventivas más importantes para reducir el riesgo de ocurrencia de un incendio. Otros autores destacan como estrategias para minimizar el riesgo de un incendio el empleo de quemas prescritas, el control de la continuidad vertical y horizontal del combustible, para minimizar la ocurrencia de fuegos de copas (Ruiz-González y Álvarez-González, 2011; Fernandes y Rigolot, 2007) o recurrir a otros modelos como la gestión silvopastoral (Pasalodos-Tato *et al.*, 2009).

En el noroeste peninsular, la gestión selvícola que permite reducir la continuidad vertical y horizontal del combustible, minimizando el riesgo de un fuego de copas, es una de las alternativas más directa y eficaz para la protección del arbolado frente a estos siniestros. Sin embargo, en esta parte del territorio existe una gran superficie de pinar en donde no se realiza una gestión adecuada de los restos generados tras las intervenciones selvícolas dando lugar, en muchas ocasiones, a un mayor riesgo de incendio. Además de las medidas preventivas, una gestión forestal adecuada deberá tener en cuenta las condiciones climáticas, topográficas, así como las características socioeconómicas que pueden suponer un importante riesgo de incendio. En este sentido, los puntos recogidos en el Plan Forestal de Asturias (Gobierno del Principado de Asturias, 2001) sobre la concienciación de la población y la conciliación de intereses podrían ser también de gran ayuda para la defensa contra la ocurrencia de incendios forestales. En cualquier caso, de acuerdo con todo lo anterior, la protección de los montes frente a estos siniestros deberá considerar un conjunto de factores, algunos ya mencionados, que ayuden a la protección de las masas forestales de la región asturiana.

1.2.1.6. Condicionantes selvícolas de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* en Asturias

En Asturias, prácticamente la mitad de la superficie forestal es privada, porcentaje muy significativo que permite ver la importancia de los propietarios forestales en la evolución y desarrollo de los montes de la región (Rodríguez *et al.*, 2006; 2007). La

titularidad del monte tiene una considerable incidencia en la actividad forestal, aunque la situación más frecuente es que cada propietario tenga varias parcelas de monte de pequeño tamaño, complicando su gestión y ordenación. Este minifundismo y el carácter de propiedad privada es el caso de la gran mayoría de las plantaciones de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* del norte de España, lo que dificulta su planificación forestal bajo herramientas de gestión a través de la aplicación de Proyectos de Ordenación o Planes Técnicos, que a su vez conforman la base indispensable para la certificación forestal de estas masas. Una de las soluciones al minifundismo presente en la región asturiana pasa por la constitución de asociaciones de propietarios o la concentración parcelaria (Rodríguez-Soalleiro y Vega, 1998; Madrigal *et al.*, 1999).

La realización de una correcta gestión selvícola se ha visto frenada por dos motivos: la falta de cultura tradicional forestal y el importante gasto económico que supone para un propietario particular, siendo por ello escasos los propietarios de la provincia que han podido considerarse a lo largo del tiempo como selvicultores, en el sentido de particulares cuya actividad principal sea la forestal en sus montes. La aparición de subvenciones europeas destinadas a la mejora productiva del monte, que cofinancian actividades selvícolas tan necesarias como el desbroce, la poda o la clara, ha permitido modificar en cierta manera esta situación. Así, aunque aun sigue siendo frecuente encontrar propietarios particulares cuya única intervención consiste en la corta de la madera para la obtención de un ingreso suplementario, muchos otros comienzan a realizar, gracias a estas ayudas, diversos cuidados culturales que preceden a la corta final. A pesar de que este cambio de actitud ha sido positivo, es necesario indicar que las pautas marcadas por las subvenciones actuales no definen con claridad los criterios técnicos que requieren las prácticas selvícolas relacionadas con el objetivo productor de una masa. Tal es el caso de la poda, cada vez más frecuente en los pinares asturianos, pero cuya realización no se ajusta en muchos casos a una gestión adecuada para la producción de madera libre de nudos que permita maximizar la obtención de un producto final de calidad.

En los montes comunales no conveniados con la Administración, a pesar de disponer de mayores superficies para aplicar Proyectos de Ordenación, es poco frecuente que los propietarios estén convenientemente organizados para definir una línea de actuaciones a largo plazo, como requiere la selvicultura; con el agravante de que los cambios en las Juntas Vecinales con frecuencia traen consigo modificaciones en los usos del suelo, cortas previas al turno y otras actuaciones antiselvícolas. Otro problema añadido es que los ingresos obtenidos de los montes raramente se invierten en la mejora del mismo y existe un notable desconocimiento de la potencialidad productiva de los montes comunales, que se encuentran en buena parte abandonados (Rodríguez-Soalleiro y Vega, 1998).

En cuanto a los montes gestionados por el Servicio de Ordenación Forestal, la realización de actuaciones selvícolas es habitual, aunque sería necesario contar con esquemas más flexibles, que permitan adaptarse a cada situación concreta y no un único esquema selvícola de aplicación generalizada, como viene siendo habitual en los últimos años (Canga, 2008). En la actualidad empieza a ser frecuente la realización de una poda baja en las masas de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster*, aunque generalmente es efectuada indiscriminadamente, tanto sobre árboles dominados como árboles con diámetro excesivo, lo que no permite rentabilizar adecuadamente la inversión realizada. Cabe destacar también, por parte de la Administración, un impulso a la realización de planes de intervenciones de clara y poda en estas dos especies.

En los esquemas selvícolas planteados por el Servicio de Ordenación Forestal de la Consejería de Agroganadería y Recursos Autóctonos para *Pinus radiata* y *Pinus pinaster*, la introducción de materiales mejorados en las repoblaciones públicas ha ido en consonancia con una disminución de la densidad inicial para las plantaciones, siendo generalmente de 1.100 - 1.333 pies/ha frente a los 1.660 pies/ha que se venían utilizando anteriormente. Las recomendaciones descritas por la Administración para la obtención de madera de calidad en las masas de estas coníferas comprenden unos primeros cuidados culturales consistentes en un primer clareo de los árboles defectuosos, junto con una roza y poda baja en todos los pies a los 7-10 años de edad para *Pinus radiata* y entre 10-14 años en *Pinus pinaster*. Una vez aclarada la masa, su densidad debería ser de aproximadamente unos 950 pies/ha. Tras esta intervención se llevaría a cabo la primera clara, a los 14-16 años de edad para *Pinus radiata* y 18-20 años para *Pinus pinaster*. El esquema planteado para esta actuación se corresponde con una clara semisistemática en la que se realizaría de forma sistemática la eliminación de una de cada siete filas y de forma selectiva, y por lo bajo, se intervendría entre calles en el resto de los pies, hasta alcanzar un porcentaje de pies extraídos en torno al 30%. Con este planteamiento, la densidad de la masa tras la intervención sería de aproximadamente 650 pies/ha (primera clara comercial de 300 pies/ha). Cuando las dimensiones del arbolado que permanece en pie fuesen adecuadas para obtener madera de calidad se recomienda la realización de la poda alta, hasta casi 6 metros de altura, en los árboles de porvenir (en torno a 500 pies/ha). En la práctica, sin embargo, la adopción de algún modelo de gestión se restringe básicamente a montes de titularidad pública, conveniados o consorciados, en los cuales los tratamientos selvícolas realizados hasta el momento han sido la poda baja y la primera clara, siendo previsible que la segunda clara sea realizada aproximadamente a los 18-22 años de edad en *Pinus radiata* y a los 24-26 años en *Pinus pinaster* (segunda clara comercial de 300 pies/ha), quedando en pie unos 350 pies/ha. Finalmente, la corta final debería realizarse en torno a los 25-35 años de edad en *Pinus radiata* y los 35-40 años en *Pinus pinaster* (corta a hecho de 350

pies/ha). En el caso de *Pinus pinaster* resultan también frecuentes en la región asturiana las masas procedentes de regeneración natural, que no siguen un marco determinado y cuya gestión implica una intervención añadida para reducir el elevado número de pies característico de estas formaciones. En estos casos, se trataría de obtener densidades de 1.100 – 1.333 pies/ha mediante la realización de un clareo selectivo previo. Como se comentaba anteriormente, este esquema selvícola tipo, propuesto por la Consejería de Agroganadería y Recursos Autóctonos para producir madera de calidad en las condiciones de los montes asturianos, debe aplicarse de forma flexible para adaptar las actuaciones en función de las características estacionales medias de cada monte (Rodríguez *et al.*, 2007).

Además de la titularidad del monte, existen otros factores que resultan determinantes en la gestión forestal de las masas asturianas, siendo destacables las condiciones ambientales y de sitio presentes en la gran mayoría del territorio. La adversa climatología y la abrupta topología del terreno dificultan enormemente la realización de los trabajos y suponen un mayor gasto económico de las operaciones, siendo muy limitado a su vez el tipo de maquinaria a emplear en estas condiciones.

Aunque cada vez son mayores las intervenciones selvícolas en los pinares de la región sigue siendo necesario mejorar la gestión aplicada en estas coníferas para aumentar tanto la cantidad como la calidad de los productos obtenidos. En este sentido, es importante destacar que la progresiva creación de asociaciones de propietarios forestales, así como los programas de formación y de investigación forestal que se están llevando a cabo en la actualidad en la región, pueden resultar de gran utilidad para modificar esta situación a medio plazo.

1.2.1.7. Los aprovechamientos forestales maderables de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* en Asturias

Asturias ocupa desde hace años una de las seis primeras posiciones en cuanto al volumen de cortas por provincias en España. Es preciso puntualizar que su posición es inferior cuando se analiza el valor de estas cortas, debido a la baja calidad de la madera extraída (Álvarez-Romero, 2001).

Las dos especies de coníferas de mayor interés productivo en la región son *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* (Figuras 1.12 y 1.13). La intensidad de aprovechamiento de cada una de estas especies es diferente en función del tipo de titularidad del monte. Dentro de los montes de titularidad pública, los pertenecientes a Convenios y Consorcios son los que cuentan con un mayor aprovechamiento. En ellos, las principales especies cortadas son *Pinus pinaster* (24% de la producción total) y *Pinus radiata* (67% de la producción total). En el resto de montes de titularidad pública, destaca también el aprovechamiento de ambas coníferas. En los montes de Utilidad Pública es *Pinus radiata* la especie que aporta un mayor volumen de cortas

mientras que en los montes del Estado o de la Comunidad Autónoma las dos especies contribuyen de igual manera.

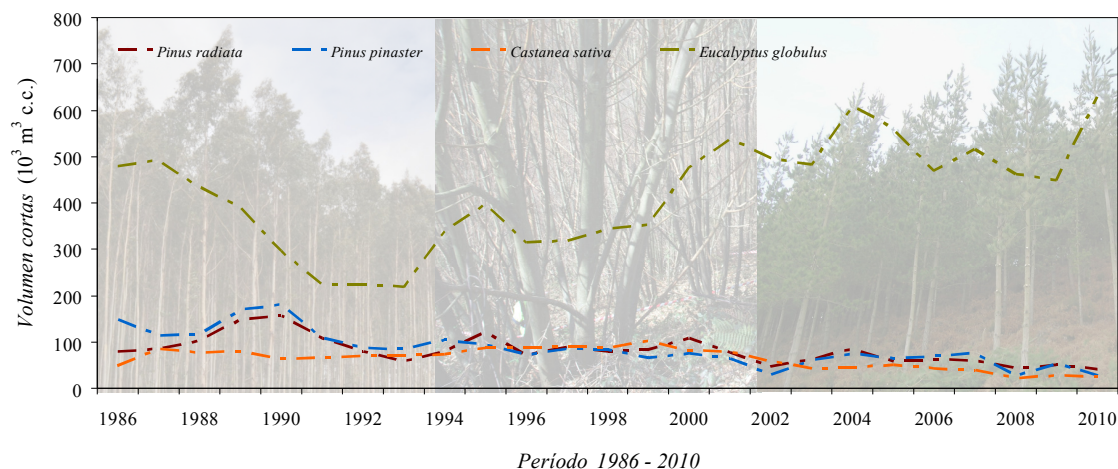


Figura 1.12. Distribución del aprovechamiento maderable de las especies de coníferas y frondosas con mayor volumen de cortas anuales en el Principado de Asturias en el período 1986-2010. Comprende montes públicos (Montes del Estado, Montes consorciados, Montes de Utilidad Pública no consorciados y Montes de Entidades Locales de libre disposición) y particulares. Fuente: Consejería de Agroganadería y Recursos Autóctonos del Principado de Asturias. Servicio de Planificación y Gestión de Montes (comunicación personal, diciembre 2011).

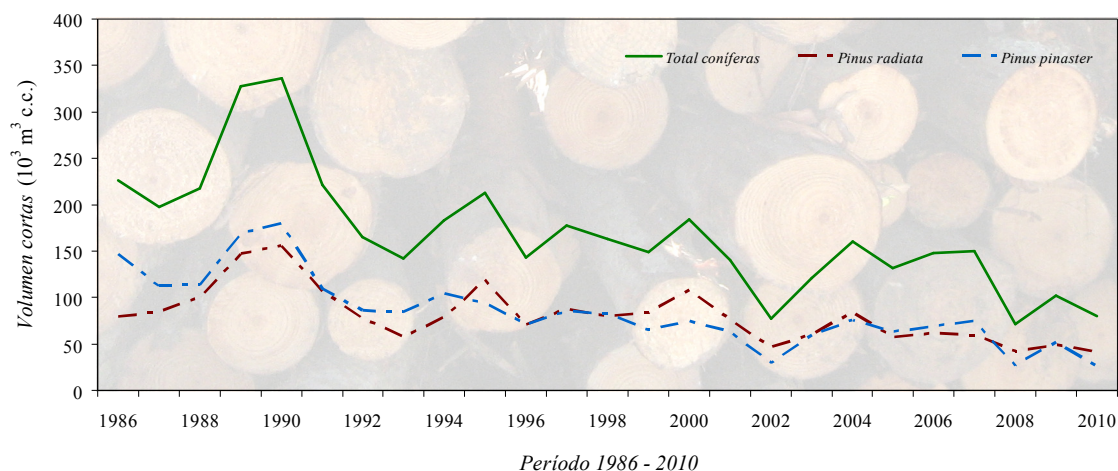


Figura 1.13. Distribución del aprovechamiento maderable de *P. radiata*, *P. pinaster* y del total de coníferas (*P. radiata*, *P. pinaster* y *P. sylvestris*) en Asturias durante el período 1986-2010. Comprende montes públicos (Montes del Estado, Montes consorciados, Montes de Utilidad Pública no consorciados y Montes de Entidades Locales de libre disposición) y particulares. Fuente: Consejería de Agroganadería y Recursos Autóctonos del Principado de Asturias. Servicio de Planificación y Gestión de Montes (comunicación personal, diciembre 2011).

Los datos facilitados por el Servicio de Planificación y Gestión de Montes de la Consejería de Agroganadería y Recursos Autóctonos del Principado de Asturias, para el conjunto de montes públicos (Montes del Estado, Montes consorciados, Montes de Utilidad Pública no consorciados y Montes de Entidades Locales de libre disposición) y particulares, en el período 1986-2010, muestran un ligero descenso en el volumen de cortas de coníferas, siendo *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* las

principales especies de coníferas cortadas en la región, con una producción total del 49% y un 48% respectivamente.

Los montes de titularidad privada juegan un papel de gran importancia en el aprovechamiento maderable de la provincia (el 80% de la madera cortada en Asturias procede de montes particulares). Dentro de estos montes *Pinus pinaster* llegó a ser la segunda especie con mayor aprovechamiento (18% de las cortas totales de particulares) en el período 1977-1985, pasando a ser la cuarta (9% de las cortas totales de particulares) entre 1995 y 2003. *Pinus radiata* se mantuvo en estos períodos como la tercera especie con mayor aprovechamiento (9-12% del total de cortas efectuadas) (Rodríguez-Menéndez, 2005).

Tal y como se puede observar en las Figuras 1.12 y 1.13, el conjunto de montes públicos y privados del Principado de Asturias han mostrado una tendencia descendiente del aprovechamiento de las principales especies maderables de la provincia, a excepción de *Eucalyptus globulus*, cuyo volumen de cortas anuales ha mostrado una tendencia creciente. Así, en el último decenio, el 76% de la producción total de madera ha sido de *Eucalyptus globulus*, seguido por *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* con aproximadamente un 10% cada una, y *Castanea sativa* Mill. con un 5% (comunicación personal, diciembre 2011).

Además de este descenso en el número de cortas realizadas en las masas de las principales coníferas del Principado de Asturias, tal y como ya se adelantó anteriormente, la madera obtenida en dichos aprovechamientos presenta un valor relativamente bajo. Esta situación hace que estos aprovechamientos madereros no puedan acceder a los destinos industriales de mayor valor añadido, a pesar de que Asturias sea una de las Comunidades Autónomas con mayores disponibilidades para producir madera.

En los últimos años está habiendo un creciente interés por la madera como material estructural tras la reciente aprobación del Código Técnico de la Edificación (Fernández-Golfin *et al.*, 2008). Este tipo de uso requiere unas condiciones de calidad de la madera que actualmente sólo aparecen de forma aislada en algunos ejemplares, pero que se puede alcanzar con una adecuada gestión. Por tanto, teniendo en cuenta la capacidad potencial productiva de los pinares de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* en Asturias, unido a la previsión de aumento de las masas productoras de estas especies que se refleja en el Plan Forestal de Asturias (Gobierno del Principado de Asturias, 2001), será necesario llevar a cabo un cambio en la gestión de estas masas para obtener una madera de mejor calidad, que permita acceder y competir en un mercado industrial más exigente y mejorar el desarrollo económico del sector forestal asturiano.

1.2.2. La ramosidad y sus efectos en la calidad de la madera

Desde un punto de vista anatómico, las ramas son originadas por yemas axilares existentes en el ángulo formado por el tallo y el peciolo de la hoja. Es por ello que las ramas se podrían definir como yemas alargadas que salen del tronco principal del árbol y de las cuales brotan habitualmente las hojas, las flores y los frutos (Barrio *et al.*, 2009). A medida que el árbol va creciendo, una porción de esas ramas irá quedando embebida en el tronco conformando los nudos que resultarán claves en la configuración de la calidad de la madera (Figura 1.14).



Figura 1.14. Árbol de *Pinus radiata* cuyas ramas (izquierda) darán lugar a una madera nudosa de baja calidad (derecha).

El desarrollo de las ramas de un árbol es, por lo tanto, un factor clave para la obtención de madera de calidad. En el género *Pinus*, las ramas se distribuyen a lo largo del fuste siguiendo un patrón de ramificación verticilada, en el que las ramas salen de la misma sección del tronco (Figuras 1.14 y 1.15).



Figura 1.15. Distribución verticilar (color verde) y ángulo de inserción de las ramas (color naranja) en un árbol joven de *Pinus pinaster* Aiton.

Las características más importantes en relación con la ramosidad del árbol para las especies de este género son la distribución y frecuencia de verticilos así como el número, ángulo de inserción, grosor y estado de las ramas (viva o muerta). Todas estas características serán determinantes en la calidad de la madera que se va a poder obtener para un uso industrial determinado (Whiteside, 1982; Briggs *et al.*, 2012) y van a estar condicionadas, a su vez, por un conjunto de factores internos, como la heredabilidad, y externos, entre los que destacan los factores ambientales (luz, agua, nutrientes del suelo, temperatura) y las prácticas culturales efectuadas, especialmente las podas y las claras (Romano, 2002), que jugarán un papel muy importante en el desarrollo de las ramas.

Son muchos los autores (p.e. Grace *et al.*, 1998; 1999; Romano, 2002; Briggs *et al.*, 2012) que han centrado su trabajo en el estudio de las características de las ramas y la influencia de estos factores internos y externos sobre las mismas. Quizá uno de los resultados más interesantes sea la relación entre la mayor frecuencia verticilar y la reducción del tamaño medio de las ramas (Burdon, 1978; Carson, 1987; 1988; Carson e Inglis, 1988) o la relación del ángulo de inserción de la rama con el tamaño de la misma, siendo preferible en éste último caso aquellas ramas que presenten ángulos con el fuste mayores de 30° (Beadle y Hall, 1999). La alta heredabilidad del carácter frecuencia verticilar (Carson, 1987) o el diámetro y ángulo de la rama, permite la selección genética dirigida hacia estos caracteres, pudiendo disponer de un material genético que presente las características más adecuadas para la obtención de una madera de mayor calidad, con menor ramosidad y/o tamaño del nudo. Sin embargo, de acuerdo con el trabajo reciente de Briggs *et al.* (2012), el control del tamaño de las ramas y, por tanto, de la nudosidad generada en la madera, resulta más efectivo mediante la gestión de la densidad de la masa que del genotipo.

La mayoría de los estudios realizados para analizar la influencia de los factores externos que afectan al desarrollo de las ramas se han centrado en las prácticas de las podas y/o las claras como herramientas de trabajo para la obtención de una mejor calidad de la madera (p.e. Grace *et al.*, 1999; Ikonen, 2008; Briggs *et al.*, 2012). La eliminación de las ramas en la parte inferior del fuste, mediante la práctica de la poda, ayudará a producir madera libre de nudos, aumentando así la calidad del producto, mientras que la realización de claros o claras va a suponer una liberación de los árboles que mejorará las condiciones de crecimiento de los mismos y, por tanto, permitirá obtener una mayor cantidad de madera de calidad.

Las plantaciones de coníferas del norte de España presentan, generalmente, un desarrollo de ramas muy abundante, con un exceso de ramosidad que repercute directamente en la calidad de la madera, produciendo una madera excesivamente nudosa. Esto ocurre en las dos especies de pino analizadas en esta tesis, aunque en

mayor grado en *Pinus radiata*. Esta última especie presenta ramas bastante persistentes aun con falta de luz, mientras que *Pinus pinaster* tiene mayor facilidad para la poda natural de sus ramas inferiores, aunque éstas pueden permanecer largo tiempo muertas y adheridas al tronco. Las ramas verdes, darán lugar a nudos vivos, que no van a desprenderse de los productos derivados de la transformación de esa madera, mientras que las ramas que se secan por procesos de autopoda formarán nudos muertos, que habitualmente se van a desprender originando huecos que pueden llegar a desvalorizar significativamente la madera obtenida (Figura 1.16).



Figura 1.16. Fuste podado de un árbol de *Pinus pinaster* con las ramas inferiores muertas (izquierda) y formación de nudos muertos en la madera, que pueden llegar a desprenderse originando huecos que deprecian su valor (centro y derecha).

Cabe destacar además que los nudos van a presentar una serie de inconvenientes de orden físico, mecánico y estético que afectan a la calidad de la madera (Vignote y Martínez, 2006). Uno de los mayores inconvenientes se relaciona con la pérdida de resistencia que se produce en la madera debido principalmente a la distorsión de las fibras alrededor del nudo, siendo mayor la reducción de la resistencia a esfuerzos de tracción y flexión. En este aspecto, la pérdida de resistencia será mayor cuanto mayor sea el tamaño del nudo (Vignote y Jiménez, 2000).

De acuerdo con Baño-Gómez (2009), la presencia de nudos es uno de los defectos más importantes para alcanzar unas buenas propiedades mecánicas en la madera, y resulta de gran importancia para el uso estructural de la misma. La existencia de nudos hace que se produzcan tensiones perpendiculares a la fibra y de cortante, además de roturas parciales que, en secciones críticas, pueden producir el fallo de las estructuras (Figura 1.17).



Figura 1.17. Rotura en un ensayo de una viga de *Pinus pinaster* en la zona que circunda dos nudos centrales existentes en la pieza.

Por todo ello, de las diferentes singularidades de la madera, los nudos son el elemento más trascendente en la clasificación visual de la misma para uso

estructural (Fernández-Golfín *et al.*, 2008), evaluándose la presencia y características de los nudos (forma, tamaño, posición, cantidad y naturaleza) de cara a la determinación de la clasificación final de la madera. Teniendo en cuenta, entre otros, estos criterios se ha desarrollado la norma UNE 56.544, que regula la calidad y propiedades de las maderas aserradas españolas destinadas al mercado estructural, entre las que se encuentran como coníferas: *Pinus pinaster*, *Pinus radiata*, *Pinus sylvestris* y *Pinus nigra* (Fernández-Golfín *et al.*, 2008). La madera que cumpla las exigencias de esta normativa se puede clasificar en dos calidades (ME-1 y ME-2) que se corresponderán con una clase resistente reconocida a nivel europeo (C-18 para *Pinus radiata* y C-24 para *Pinus pinaster*).

Se pueden encontrar en la bibliografía una gran cantidad de estudios que tratan de explicar la relación existente entre la ramosidad y la calidad del producto final (p.e. Whiteside, 1982; Todoroki *et al.*, 2001; 2005; Xu, 2002). Uno de los trabajos iniciales más relevantes en este sentido fue el desarrollado por Whiteside (1982), quien investigó los efectos del tamaño de la rama en la calidad de la madera, evaluando diversos índices en trozas de madera aserrada. Los mejores resultados los obtuvo al emplear el denominado índice de ramosidad (*BIX*, término en inglés “*Branch Index*”), definido previamente por Inglis y Cleland (1982) como el diámetro medio de las cuatro ramas de mayor tamaño, una de cada cuadrante, para una longitud de troza determinada.

Este índice ha mostrado ser un buen indicador de los efectos del tamaño de la rama en la clasificación y valor final de la madera de diferentes especies forestales (p.e. Maguire *et al.*, 1991; DeBell y Gartner, 1997) y ha sido utilizado, con buena precisión en modelos de ramosidad y de calidad de madera de *Pinus radiata* y *Pinus taeda* bajo diferentes escenarios selvícolas (p.e. Inglis y Cleland, 1982; Millar, 2003; Trincado, 2006).

De acuerdo con todo lo anterior, parece obvio que las prácticas selvícolas para obtener madera de calidad deben ir dirigidas a favorecer la ausencia de nudos de gran tamaño así como la reducción de su número a lo largo del tronco. También es deseable evitar la formación de nudos muertos. Para ello, tal y como se citó anteriormente, una adecuada combinación de las podas y las claras puede ser una herramienta muy útil, ayudando a corregir la nudosidad que puede producirse en la madera y que deprecia su valor. Además, de acuerdo con Barrio *et al.* (2009), el empleo de procedencias adecuadas, asociado o no a programas de mejora genética para los caracteres que influyen en la nudosidad, es otra de las cuestiones que se deben abordar para minimizar la presencia de nudos en la madera (Shelbourne *et al.*, 1997; Sierra de Grado *et al.*, 1999; Aguiar *et al.*, 2003; Zas *et al.*, 2004).

La distribución de las ramas y la arquitectura de la copa de un árbol también tienen su influencia en la propia forma de los troncos. El mayor crecimiento del

árbol se encuentra en la zona con ramas. Así, cuando los árboles están despojados (natural o artificialmente) de las ramas bajas, el crecimiento se concentra en la parte terminal del árbol. Si las ramas se extienden por todo el fuste, el crecimiento estará repartido a lo largo de todo el tronco, con un mayor incremento en la zona inferior del árbol, que es donde se concentra el mayor volumen de ramas laterales. Esto hace que cuando el árbol conserva todas las ramas de la parte basal del tronco su forma es más bien cónica, mientras que cuando se eliminan las ramas de la parte inferior, el fuste del árbol adquiere una forma más cilíndrica, lo que le incrementa su aprovechamiento para algunos usos (Echevarría, 1959) (Figura 1.18).

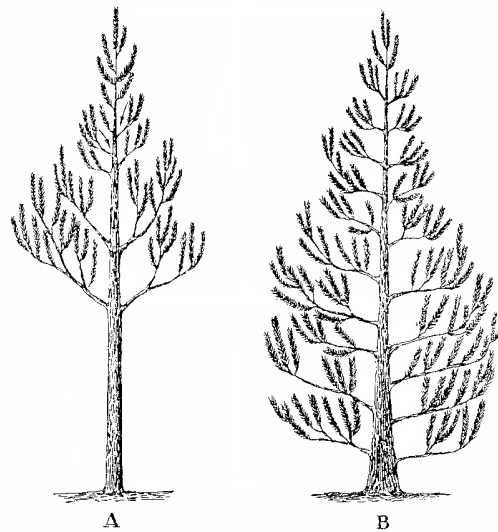


Figura 1.18. Forma del tronco más cilíndrica para un pino podado en su parte baja (A) y más cónica para un pino sin podar, que conserva todas sus ramas (B). Fuente: Adaptado de Echevarría (1959).

1.2.2.1. Las ramas epicórmicas

De acuerdo con Barrio *et al.* (2009), en determinadas especies y bajo ciertas condiciones, se pueden presentar otro tipo de ramas diferentes a las descritas previamente. Este tipo particular de ramas, denominadas ramas epicórmicas, brotes epicórmicos, brotes chupones o, simplemente chupones, se corresponden con ramas originadas a partir de yemas adventicias (Figura 1.19). Fontaine *et al.* (1998) las definen como un tipo especial de ramas que salen de forma tardía en tallos ya desarrollados a partir de yemas latentes situadas bajo la corteza (brotes proventicios) o bien a partir de nuevas yemas que se forman en los tejidos de los callos de cicatrización (brotes adventicios).

Los factores que desencadenan el desarrollo de estos brotes no son tan conocidos como su origen (Kerr y Harmer, 2001). Algunos autores como Collier y Turnblom (2001) defienden la teoría de que su aparición se produce como respuesta a cambios en la temperatura, luz y/o balance hormonal en los tejidos del tronco. Esto implicaría

que cualquier modificación en la estructura o espesura de una masa forestal que desencadenase cambios en cualquiera de las condiciones anteriormente mencionadas, como las podas y las claras, la mortalidad natural, los daños mecánicos o por plagas y enfermedades, o la combinación de alguno de éstos, podrían generar el desarrollo de las yemas inhibidas, dando lugar a brotes epicórmicos. Otros factores que están implicados en la aparición de este tipo de brotes, y que además interactúan de forma conjunta (Espinosa y Muñoz, 2005), son: la clase de copa del árbol (mayor predisposición en árboles suprimidos), la especie (poca predisposición en coníferas, con excepciones como *Pinus radiata*), la edad del árbol (mayor predisposición a menor edad), la posición del árbol en la masa (mayor predisposición en los bordes del rodal), la exposición del tronco (mayor tendencia en los lados del tronco situados hacia las exposiciones más cálidas).



Figura 1.19. Brotes epicórmicos desarrollados en un árbol podado de *Pinus radiata* D. Don.

En cualquier caso, la aparición de este tipo de ramas epicórmicas puede reducir la calidad y el valor de la madera y, por tanto, será uno de los factores a tener en cuenta a la hora de realizar una silvicultura enfocada a producir madera de calidad. Es por ello que muchos autores han centrado sus trabajos en el conocimiento del comportamiento de especies de interés productivo ante la realización de tratamientos selvícolas (especialmente podas) que puedan generar ese tipo de brotes (p.e. O'Hara, 1991; O'Hara y Valappil, 2000; Collier y Turnblom, 2001).

1.2.3. La poda

1.2.3.1. Características generales de la poda: definición, tipos y objetivos

La poda se puede definir como la eliminación de determinadas ramas de un árbol, mediante el corte de las mismas, siguiendo diferentes criterios en función de la finalidad de la operación (Rodríguez-Soalleiro y Vega, 1998; Montoya y Mesón, 2004). En algunas especies la poda se puede producir de forma natural, especialmente cuando se trata de especies de luz que se desarrollan en masas espesas. En estos casos, las ramas que quedan a la sombra y bajo el nivel de

tangencia de las copas detienen su crecimiento, y se defolian desde la base hacia la punta, para después morir desde la punta hacia la base. Muchas ramas muertas acaban cayendo, pero en determinadas especies pueden llegar a resistir mucho tiempo adheridas al tronco formando los denominados “nudos muertos” o “suelos”, que deprecian enormemente la madera (Rodríguez-Soalleiro *et al.*, 1997; Nutto *et al.*, 2003; Montoya y Mesón, 2004) y que solamente podrán ser evitados mediante la realización adecuada de la poda artificial o poda propiamente dicha.

Se suele hacer una diferenciación de la poda en función de la altura que alcanza en el árbol. Normalmente se distingue entre poda baja (de 0 m a 2-2,6 m), que se efectúa desde el suelo y con herramientas no enmangadas; y poda alta (hasta 6-6,5 m), que requiere el uso de pértigas o herramientas especiales para su ejecución, pudiendo emplear también muchas de las herramientas pensadas para la poda baja con ayuda de sistemas de elevación como las escaleras (Rodríguez-Soalleiro y Vega, 1998) (Figura 1.20).



Figura 1.20. Intervenciones de poda baja (izquierda) y poda alta (derecha) realizadas mediante tijeras de poda en una masa de *Pinus radiata* D. Don durante la instalación del dispositivo experimental empleado en la presente tesis.

En un sentido amplio, la poda puede realizarse para alcanzar diferentes objetivos como mejorar el acceso (podas de penetración), proteger frente al fuego (podas de defensa) y, principalmente, para conseguir madera libre de nudos (podas madereras).

Las pautas a seguir para podas de penetración son sencillas. Se trata de facilitar el acceso y la penetración de las personas en la masa para permitir las labores forestales o el recreo, con lo que teóricamente bastaría con podar hasta 2-2,2 metros de altura y con hacerlo tan sólo a lo largo de vías de acceso deseadas. Sin embargo, en la práctica, se suele realizar una poda hasta los 2,6 metros de altura, para conseguir una primera troza basal de 2,5 metros limpia de ramas. En ocasiones, en montes recreativos, se aplica la poda a todo el arbolado y no sólo a unas pocas vías de penetración. Son podas bajas, que se practican normalmente desde el suelo.

Las podas de defensa buscan principalmente romper la continuidad vertical de los combustibles para reducir la posibilidad de ocurrencia de un fuego de copas. En las “fajas auxiliares” de los bordes de caminos y en los mismos bordes de los cortafuegos son habituales este tipo de podas, efectuadas hasta unos 4-5 metros de altura.

En el caso de las podas madereras dirigidas a producir madera de calidad (libre de nudos), hay que diferenciar dos tipos de poda: las tallas de formación y las podas propiamente dichas.

La talla de formación es una operación selectiva que se lleva a cabo en la copa del árbol buscando el desarrollo de fustes rectos. Una de las principales actuaciones a realizar consiste en la definición de una sola guía principal en aquellos árboles que presentan múltiples guías. Las tallas de formación también tratan de eliminar ramas excesivamente largas o aquellas que se desarrollan siguiendo la vertical del árbol y puedan llegar a competir con la guía terminal o a formar nudos de gran tamaño como consecuencia del ángulo de inserción de este tipo de ramas.

Este tipo de intervención se debe realizar en edades tempranas del árbol para asegurar una mayor efectividad del tratamiento así como facilitar el proceso de corte y posterior cierre de las heridas, al tratarse de ramas de menor tamaño. Además, se debe tener la precaución de no reducir una proporción importante de la copa verde del árbol, eliminando demasiadas ramas al mismo tiempo, ya que esto afectaría de forma negativa al crecimiento del mismo.

La poda propiamente dicha consiste en la eliminación de las ramas inferiores del árbol para asegurar la obtención de una proporción suficiente de madera libre de nudos, en al menos la primera troza basal. En el mejor de los casos, para los árboles de mayor calidad, se puede optar por la obtención de madera limpia en las dos o tres primeras trozas. Para conseguir esto, la poda puede ser realizada en una o en varias etapas, atendiendo siempre al tamaño del árbol para intervenir en el momento más adecuado. A pesar de que, tal y como se comentó anteriormente, por razones económicas se suele realizar la poda con el menor número de intervenciones posible, desde el punto de vista de calidad del producto final es preferible la realización de esta operación de una manera progresiva y moderada, mediante la eliminación de las ramas en más de una etapa. El esquema de poda adoptado en cada caso será determinante en el resultado final de la operación.

Cualquiera de las fases de poda aquí planteadas, desde las propias tallas de formación hasta las podas más altas, para obtener más de una troza libre de nudos, son operaciones costosas, cuya realización tan solo estaría justificada cualitativa y económicamente cuando se trate de operaciones efectuadas en los árboles de mayor calidad, sanos y con buena conformación que van a llegar con mayor probabilidad al final del turno y que nos van a reportar con mayor seguridad un producto de buena

calidad. No tendría sentido realizar este tipo de intervenciones en árboles de mala calidad, enfermos o con mala conformación. Tan solo podría justificarse la poda de todo el arbolado, independientemente de su calidad o conformación, como medida de prevención de incendios o de mejora de acceso y penetración en la masa, pero no como una operación selvícola desde un punto de vista productivo.

1.2.3.2. Podas para producir madera de calidad en coníferas

La poda debe efectuarse siguiendo una serie de requisitos técnicos y en combinación con otras actividades selvícolas (Davel y Sepúlveda, 2000), especialmente las claras realizadas en el momento oportuno y de la forma más adecuada, para conseguir una mayor eficiencia sin reducir el crecimiento del árbol. La no realización de estas intervenciones selvícolas dará lugar a un alargamiento del turno de corta y a una disminución en la calidad del producto final (Davel y Sepúlveda, 2000).

Solo se podrá hablar de madera de calidad cuando se cumplan una serie de requisitos, como son (Fernández-Manso y Sarmiento-Maillo, 2004):

- Diámetro mínimo: los árboles deben tener unas dimensiones suficientes al final del turno para poder obtener productos de calidad. La realización de claras resulta clave para el mayor crecimiento diametral del árbol.
- Fuste recto y cilíndrico: la buena forma de los árboles confiere mejores condiciones tecnológicas y permite maximizar el posterior rendimiento industrial. De forma general, las podas ayudan a formar fustes más rectos, mediante las tallas de formación, y cilíndricos, mediante las podas propiamente dichas.
- Fuste libre de ramas: la eliminación de las ramas en las trozas basales permite minimizar la proporción de nudos y maximizar la cantidad de madera limpia en la zona inferior del fuste.
- Material homogéneo: la madera con anillos regulares ayuda a producir un material más homogéneo, menos nervioso y más estable en el secado.
- Ausencia de defectos externos e internos: la presencia de defectos va a limitar el uso de esa madera. La realización de claras permite la eliminación de los árboles que previsiblemente pueden presentar algún tipo de defecto.
- Madera sana: los árboles deben de presentar un buen estado sanitario para asegurar que la madera se encuentra en buenas condiciones. Nuevamente el empleo de claras va a resultar la mejor técnica selvícola para asegurar este requisito, seleccionando los mejores árboles para llegar hasta el final del turno.

En conjunto, se puede apreciar que para obtener madera de calidad hace falta combinar correctamente las podas y las claras.

El valor de mercado final de la madera viene determinado, en gran medida, por el tamaño y la rectitud del tronco así como por la presencia y número de nudos. Así, por ejemplo, el precio alcanzado por la madera de coníferas en el mercado de Argentina ha mostrado en los últimos años diferencias de entre un 30% y un 60% entre trozas podadas y no podadas para diámetros en punta delgada superiores a los 35 cm (Costas *et al.*, 2005), lo que compensaría el desembolso a realizar por la actividad de la poda. Sin embargo, esas diferencias no reflejan realmente el valor de los productos que se pueden obtener de una y otra madera debido a que la clasificación y su valor se basan en una evaluación de la calidad de las trozas antes del apeado del árbol, lo que genera inseguridad y desconfianza entre el comprador y el vendedor.

Para evitar este inconveniente y garantizar un precio de compra adecuado al valor del producto, en Nueva Zelanda se ha desarrollado un sistema de certificación de la poda para masas de *Pinus radiata* que permite garantizar la trazabilidad de todos los procesos y la consecuente revalorización del aprovechamiento final (p.e. Somerville, 1991; Lyons, 1997). La implantación de un sistema similar podría ser muy interesante para los pequeños propietarios del arco atlántico, al permitir reducir el riesgo de venta de la madera a un precio inferior al correspondiente con su calidad.

A continuación se recogen algunos de los puntos más importantes relacionados con las podas para producir madera libre de nudos. En primer lugar, se explican las variables más empleadas para evaluar la calidad del tratamiento de poda. Posteriormente, se comentan algunos de los efectos que puede tener esta práctica selvícola sobre el crecimiento y desarrollo del árbol así como sobre la propia dinámica de la masa forestal. Por último, se presentan diversos aspectos determinantes en el resultado final de las podas para producir madera de calidad, como son: los árboles a podar, la técnica de corte, la época de poda, el momento de realización, la intensidad o el número de intervenciones, bajo un planteamiento de silvicultura sostenible en el que sean considerados también los efectos de la poda sobre la persistencia del sistema forestal intervenido.

1.2.3.2.1. Variables que definen la calidad de la poda

Las principales variables dendrométricas que se relacionan con la calidad de la poda, entendida como la proporción de madera libre de nudos que se obtendrá en la corta final, son el diámetro sobre muñón (*DSM* o *DOS*, término en inglés “*Diameter Over Stubs*”) y el diámetro sobre oclusión (*DSO* o *DOO*, término en inglés “*Diameter Over Oclusion*”). En esta tesis, para referirse a dichas variables, han sido utilizadas las iniciales correspondientes con sus nombres en castellano, *DSM* y *DSO*.

El *DSM* es el diámetro sobre muñón existente en la parte podada del fuste, que en las especies con ramificación verticilada, como *Pinus radiata* y *Pinus pinaster*, se corresponderá con el diámetro sobre los verticilos podados (Figura 1.21). El valor máximo que alcanza este diámetro en la zona del fuste podada se denomina diámetro máximo sobre muñón (DSM_m) y está directamente relacionado con el volumen de madera del fuste que, en el momento de la corta final, contendrá los defectos.

Una vez cerradas las heridas de poda, todos los defectos quedarán confinados en una zona nudosa en el centro del árbol, cuyo diámetro recibe el nombre de diámetro sobre oclusión (*DSO*) (Figura 1.21). Este centro nudoso va a contener en su interior la médula, los muñones de poda, la oclusión de las heridas y cualquier irregularidad del fuste (sinuosidades) en el momento de la poda (Park, 1980; 1982; 1985). Aunque en la bibliografía resulta muy frecuente encontrar este concepto con la denominación de “cilindro defectuoso” en muchas ocasiones, especialmente en coníferas, la forma del árbol no se ajusta exactamente a un cilindro. Por ello, para este trabajo se ha decidido emplear “centro nudoso”, “centro defectuoso” o “centro con defectos” para referirse a dicha variable, sin especificar ninguna forma concreta del árbol.

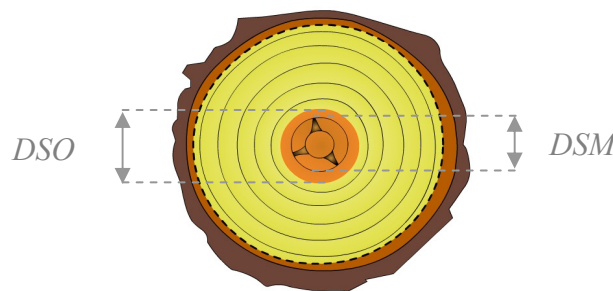


Figura 1.21. Corte transversal de un árbol podado. Se puede apreciar el diámetro sobre muñón (*DSM*) y el diámetro sobre oclusión (*DSO*), a partir del cual se forma la madera libre de defectos (color amarillo). Fuente: Elaboración propia, adaptado de Reid y Stephen (2001).

A partir de este centro nudoso se formará madera libre de defectos o, lo que es lo mismo, madera limpia. Por lo tanto, minimizar el valor del *DSO* para un tronco de un diámetro determinado permitirá maximizar el volumen de madera de calidad obtenido (Figura 1.22). Sin embargo, una vez ocluidos los muñones de poda, el *DSO* quedará oculto dentro del fuste, dificultando su medición o predicción. Para solventar esto, existen estudios que han logrado establecer una buena relación entre el *DSO* y el DSM_m . Por esta razón, este diámetro máximo sobre muñón (DSM_m) es una variable de control muy útil para decidir el momento óptimo de realizar la poda.

No existen estudios que relacionen estos dos diámetros para *Pinus pinaster*, aunque para *Pinus radiata* se ha establecido que el diámetro sobre oclusión (*DSO*) es entre 3 cm y 6 cm mayor que el diámetro máximo sobre muñón (DSM_m), dependiendo de factores como la calidad de corte, el tamaño de las ramas cortadas, el crecimiento del árbol o la calidad de estación (Sotomayor *et al.*, 2002).

Las recomendaciones generales de poda para la producción de madera de calidad, tomando como referencia la información definida para distintas especies de pino (*Pinus radiata*, *Pinus taeda*, etc.), son relativamente variables, aunque en casi todos los casos introducen la poda para valores de DSM_m inferiores a 15 cm (p.e. Rodríguez-Soalleiro *et al.*, 1997; Muñoz, 1998; Dans del Valle *et al.*, 1999; Private Forests Tasmania, 2004; Chauchard y Olalde, 2005; 2006). Las revisiones bibliográficas realizadas Dans del Valle *et al.* (1999) para *Pinus radiata* y por Rodríguez-Soalleiro *et al.* (1997) para *Pinus pinaster*, apuntan a que la realización de podas con valores del DSM_m inferiores a 8 cm podrían comprometer el crecimiento y desarrollo posterior del árbol, mientras que las podas realizadas para valores del DSM_m superiores a 15 cm en árboles menos vigorosos o 25 cm en árboles dominantes no serían recomendables para la producción de madera limpia.



Figura 1.22. Centro nudoso y madera limpia en un árbol podado con un tamaño del DSM_m adecuado (izquierda) y con un DSM_m excesivo (derecha). Fuente: Adaptado de Reid y Stephen (2001).

De acuerdo a lo descrito a lo largo de este apartado, el planteamiento más idóneo debe considerar el momento óptimo de poda atendiendo al tamaño del DSM_m para minimizar el DSO y maximizar la cantidad de madera libre de nudos. Sin embargo, también es importante que la altura alcanzada con esta operación no suponga la eliminación de más de la mitad de la copa verde del árbol, con el objetivo de minimizar el posible efecto negativo que puede tener esta operación sobre el crecimiento y desarrollo posterior del árbol.

Algunos autores (p.e. Private Forests Tasmania, 2004) recomiendan realizar varias intervenciones en masas de *Pinus radiata*, dejando en cada una de ellas una copa verde de 3 o 4 metros de longitud. Con estas indicaciones, aseguran que se lograría obtener dos trozas con madera libre de nudos, con un tamaño del DSM adecuado (Figura 1.23).

Sea cual sea la referencia tomada para la realización de la poda en varias etapas, siempre se debe tener la precaución de que las intervenciones sean realizadas cuando el valor del DSM sea igual al obtenido en la operación anterior (Davel y Sepúlveda, 2000). Si ese valor es mayor, se estará realizando una poda tardía mientras que si es menor, la poda se estará realizando antes de tiempo. Si no se tiene en cuenta esta

consideración y el *DSM* adquiere un valor diferente en las siguientes operaciones se estará perdiendo el efecto conseguido en la primera intervención y, por tanto, se perdería también cualquier justificación cualitativa y económica de la poda.

Si se tiene en cuenta que no se puede eliminar demasiada copa verde en el árbol, para una masa no homogénea resultará difícil elevar la altura de poda por igual en todos los individuos que van a llegar al final del turno. Es por eso que se habla en ocasiones de una nueva fase de poda (en inglés se denomina “*catch-up*”) en la que se realizaría la eliminación de ramas hasta una altura determinada tan solo en aquellos árboles en los que no había sido posible alcanzar la altura deseada en las intervenciones realizadas previamente. Con esta nueva fase se podría igualar la altura de poda para todos los árboles de porvenir. El criterio seguido en estos pies consistiría igualmente en podar cuando el verticilo más bajo alcanzase el *DSM* objetivo, determinado y mantenido desde la primera intervención. Evidentemente, la realización de esta nueva fase de poda supondrá un mayor coste económico de la operación.

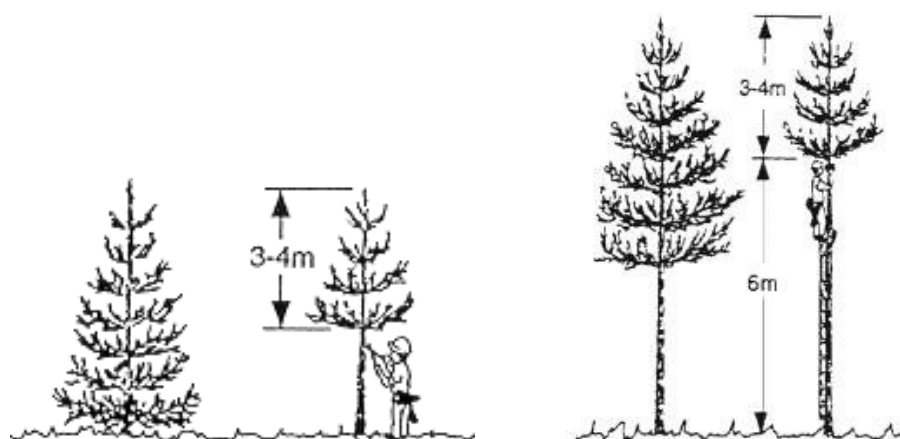


Figura 1.23. Poda para producir madera de calidad en *Pinus radiata*, realizada en varias etapas, dejando 3-4 metros de longitud de copa. Fuente: Adaptado de Private Forests Tasmania (2004).

Una de las observaciones que debe realizarse en los árboles podados, especialmente aquellos que han sido sometidos a podas de mayor intensidad, es la posible existencia de brotes epicórmicos en la parte del fuste podado. Es especialmente importante su eliminación, sobre todo en el caso de los brotes que pueden llegar a permanecer adheridos en el tronco durante mucho tiempo, adquiriendo en ocasiones un desarrollo similar al de cualquier otra rama del árbol. En estos casos, los brotes serían defectos importantes que podrían depreciar el valor de la madera si no son eliminados a tiempo. Lo más práctico y económico para su eliminación sería aprovechar el momento de realización de las siguientes intervenciones de poda.

1.2.3.2.2. Efectos de la poda sobre el crecimiento, desarrollo y persistencia de la masa

A pesar de que se ha venido describiendo el efecto de las podas en la calidad de la madera, es importante señalar también los efectos que este tratamiento cultural pueden tener sobre el propio crecimiento y desarrollo del árbol, así como sobre la propia dinámica y persistencia de la masa forestal. Rodríguez-Soalleiro y Vega (1998) describen en su trabajo muchos de estos efectos, siendo evaluados algunos de ellos a lo largo de los capítulos posteriores de la tesis (forma y crecimiento del árbol, producción de la masa, balance nutricional del sistema, contenido de carbono y riesgo de incendio), y para los cuales se presenta en este apartado una breve descripción inicial.

La influencia de la poda sobre la forma del fuste ha sido observada en estudios como los de Pinkard y Beadle (1998) o Rodríguez (2005), entre otros, siendo explicado este efecto por la modificación de la distribución del crecimiento a lo largo del tronco tras la poda, con un mayor reparto del crecimiento en las zonas superiores del fuste, dando lugar así a troncos de conformaciones más cilíndricas (p.e. Echevarría, 1959; Larson, 1965), y por tanto de mayor interés industrial por su mejor rendimiento en el procesado y por la obtención de productos de mayor valor añadido.

El efecto de la poda en el crecimiento, en muchos casos, ha mostrado ser diferente para el diámetro y la altura del árbol. Esto ha sido explicado por autores como Sutton y Crowe (1975), Aunós (1991), Neilsen y Pinkard (2003) o Amateis y Burkhart (2010; 2011), entre otros, en base a la mayor sensibilidad del crecimiento en diámetro con respecto a la altura. Esta influencia del tratamiento sobre el crecimiento, al igual que en el caso de la forma del árbol, va a depender además de otros factores asociados como el estatus social de los árboles, la intensidad de la intervención, la especie, las condiciones de crecimiento o la gestión selvícola de la masa. Además, y tal y como se ha mencionado ampliamente en la bibliografía (p.e. Sutton y Crowe, 1975; Endo y Velez-Mesa, 1992; De Montigny y Stearns-Smith, 2001; Amateis y Burkhart, 2006), el efecto de la poda sobre el posterior crecimiento y desarrollo del árbol no siempre perdura a largo plazo. Todos estos factores, a su vez, van a ser determinantes en la productividad final de la masa y la calidad del producto obtenido.

Por otro lado, la realización de la poda en una masa forestal va a presentar un efecto directo sobre el balance nutricional de la masa, el contenido de carbono y los riesgos sanitario y de ocurrencia de incendios. Esto es así por la biomasa residual generada en dicha operación selvícola, que debe ser gestionada de forma adecuada para minimizar el impacto de la intervención sobre el sistema forestal intervenido. De todos los factores asociados con la gestión de restos, cabe destacar el riesgo de

incendio, dada la importancia de este tipo de evento en la zona noroeste peninsular. En este aspecto, la modificación de la distribución de los combustibles del dosel de copas tras la poda podría ser utilizada como herramienta de prevención de incendios. Este enfoque resulta aun más efectivo cuando se realiza una gestión combinada de podas y claras, dada la menor continuidad vertical y horizontal del combustible que se genera tras la aplicación de estos tratamientos. Esto ha sido observado en trabajos como los de Agee y Skinner (2005), Fernandes y Rigolot (2007), Scott y Reinhardt (2007a) o Bennett, (2010), entre otros, que han señalado la reducción del riesgo de incendio tras la aplicación de podas y claras. Por otra parte, la realización de estas intervenciones selvícolas supone una extracción importante de carga de combustible que puede conllevar, a su vez, a un mayor riesgo de incendio, o incluso de posibles problemas sanitarios, si la biomasa residual obtenida no se gestiona de forma correcta (p.e. Weatherspoon y Skinner, 1995; Kalabokidis y Omi, 1998; Stephens, 1998). Es por ello que la gestión de los restos de poda resultará clave en la propia dinámica de la masa, con especial importancia en el noroeste peninsular, en donde resulta frecuente el abandono de los restos en el monte, y cuya presencia sobre el terreno puede llegar a provocar un mayor riesgo sanitario y de incendios. La quema de restos ha sido también una práctica relativamente frecuente en esta zona del territorio con la consecuente pérdida de nutrientes, generación de CO₂, así como mayor riesgo sanitario y de ocurrencia de incendios. De todas las alternativas para la gestión de la biomasa residual obtenida tras la realización de las podas y las claras, la más sostenible sería la trituración e incorporación de los restos en el terreno, siempre que las condiciones del sitio lo permitan, pudiendo minimizar así los riesgos bióticos y abióticos, así como la influencia de los tratamientos sobre el balance nutricional de la masa (Geldres *et al.*, 2006).



CAPÍTULO 2

Material y métodos

MATERIAL Y MÉTODOS

En este capítulo se recoge la descripción general del dispositivo de parcelas, diseño experimental y establecimiento de los ensayos, así como las metodologías de recogida, elaboración y análisis de los datos empleados para la consecución de los objetivos de la presente tesis doctoral.

2.1. Dispositivo de parcelas

2.1.1. Selección de las parcelas

El Servicio Regional de Investigación y Desarrollo Agroalimentario (SERIDA), de la Consejería de Agroganadería y Recursos Autóctonos del Principado de Asturias, en colaboración con la Dirección General de Política Forestal del Principado de Asturias y la Universidad de Santiago de Compostela, por medio de la Unidad de Gestión Forestal Sostenible (abreviado en gallego *UXFS*), establecieron, en el invierno de 2005-2006, una red experimental de sitios de ensayo de podas y claras conformada por ocho parcelas permanentes, cuatro de *Pinus radiata* y cuatro de *Pinus pinaster*, con el objetivo de evaluar los efectos de las podas y las claras en el crecimiento, desarrollo y calidad de la madera de las masas de ambas coníferas en el Principado de Asturias.

A finales de 2005 se procedió a la selección de los rodales que conformarían la red experimental. Para ello, se buscaron masas gestionadas por la Consejería de Agroganadería y Recursos Autóctonos del Principado de Asturias, que fuesen representativas dentro del área de distribución de ambas especies en la Comunidad Autónoma de Asturias. Se trataron de seleccionar rodales con homogeneidad en las densidades, correspondientes con las empleadas tradicionalmente en la región. Todos ellos estuvieron localizados en masas puras, coetáneas o regulares, que se encontraban en un estado de monte bravo-latizal. Las parcelas de *Pinus radiata* fueron instaladas en masas coetáneas procedentes de plantación, situadas en la zona interior de la provincia, mientras que para *Pinus pinaster* los ensayos fueron establecidos en rodales regulares, de origen natural y repoblación, situados en las zonas costera e interior de la región (Figura 2.1).

En todo momento se procuró que la selección de las parcelas se llevase a cabo en rodales con un rango de edades adecuado para la ejecución de las actividades selvícolas planteadas en el diseño experimental (podas y claras), no siendo posible la

obtención, en todos los casos, de masas que se encontrasen en el momento óptimo para la realización de la primera intervención de poda de cara a la producción de madera de calidad, especialmente para *Pinus radiata*, en donde la mayoría de los sitios disponibles para la instalación de los ensayos tenían árboles con tamaños superiores a los recomendados en la bibliografía para este fin.

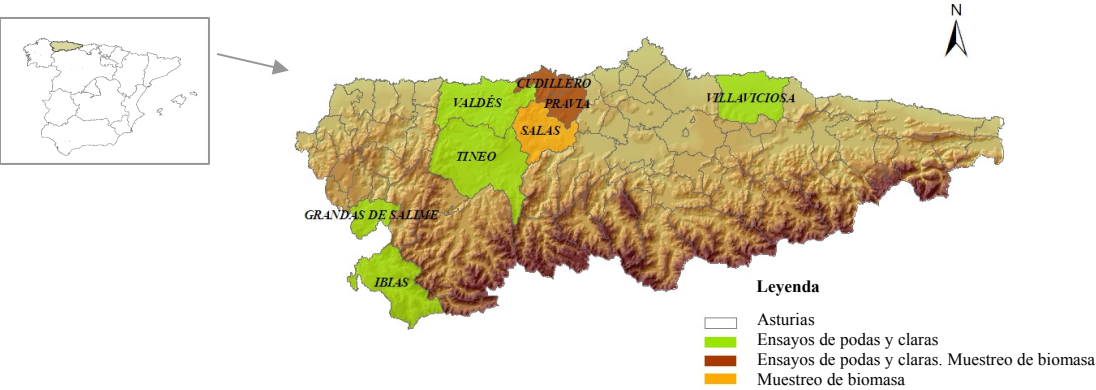


Figura 2.1. Localización (concejos) de las parcelas utilizadas en la presente tesis: ensayos de podas y claras de *P. radiata* y *P. pinaster* (parcelas permanentes; marrón y verde), y estudio de biomasa arbórea de *P. pinaster* (parcelas temporales; marrón y naranja). Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 2.1 se recoge la tipología de cada parcela, en función del número de mediciones realizadas en cada una de ellas. Asimismo, en dicha tabla se describe la localización de las parcelas, incluyendo el concejo, el monte y la comarca forestal a la que pertenecen. Esta comarca se corresponde con una zona del territorio en la que las características forestales, económicas y sociales son consideradas como homogéneas, definidas así por el Gobierno del Principado de Asturias (2001) para la mejor planificación y gestión de los montes.

Tabla 2.1. Localización (comarca forestal, concejo y monte) y tipología de las parcelas evaluadas en este trabajo.

Especie	Comarca forestal	Concejo (Monte)	Tipología
<i>Pinus radiata</i>	Centro-Oriente	Villaviciosa (La Campa)	<i>Perm</i>
	Occidente-Norte	Tineo (Cabada)	<i>Perm</i>
	Centro-Occidente	Pravia (Santa Catalina)	<i>Perm</i>
	Occidente-Centro	Grandas de Salime (Fabal)	<i>Perm</i>
<i>Pinus pinaster</i>	Occidente-Norte	Cudillero (Valsera)	<i>Perm-Tem</i>
	Occidente-Norte	Valdés (Barcia)	<i>Perm</i>
	Centro-Occidente	Pravia (Monteagudo)	<i>Perm-Tem</i>
	Occidente-Centro	Ibias (Uría)	<i>Perm</i>
	Occidente-Norte	Salas (Loris)	<i>Tem</i>

donde *Perm* se corresponde con una parcela permanente (varias mediciones periódicas); *Tem* se corresponde con una parcela temporal (una sola medición); y *Perm-Tem* se corresponde con una parcela de ambos tipos (permanente y temporal).

2.1.2. Características de las parcelas

Las principales características de los rodales utilizados en la presente tesis doctoral han sido recogidas en una ficha descriptiva elaborada para cada parcela de ensayo (ver anexo). En cada ficha, han sido considerados los siguientes componentes:

- Localización geográfica: se muestra la situación del ensayo sobre el mapa de distribución de la especie principal del rodal (*Pinus radiata* o *Pinus pinaster*), considerando teselas en las que la especie aparece como dominante (MIMAM, 2003). Se presentan además las coordenadas (X,Y) UTM referidas al sistema de referencia European Datum 1950, en los husos 29 y 30, así como los datos de provincia, concejo y monte.
- Características y tipología de la masa: se detalla la especie principal y algunas características descriptivas relacionadas con el origen de la masa, edad de los pies, composición específica y clases naturales de edad.
- Características del sitio de ensayo: se recogen la edad (estimada mediante las muestras extraídas con barrena de Pressler), el índice de sitio (*IS*, determinado para una edad de referencia de 20 años, mediante los modelos descritos recientemente para ambas especies en Asturias -Canga, 2008; Álvarez-Álvarez *et al.*, 2011-, cuya expresión matemática es recogida en el apartado 2.5.2 de este capítulo) y la superficie de las parcelas (medida mediante estación total). Asimismo, se recoge una breve descripción fisiográfica, edafológica y climatológica del área de estudio.

Para la caracterización fisiográfica de cada parcela fueron detallados los valores mínimo, máximo y promedio de altitud (m.s.n.m.) y pendiente (%), así como el valor medio de orientación, obtenidos a partir del modelo digital del terreno creado para cada parcela mediante el software ArcGIS 9.1[®] (ESRI, 2006).

La caracterización edafológica de las parcelas fue encargada a un laboratorio externo de referencia, acreditado para el análisis químico de suelos. La muestra analizada fue obtenida mediante la homogeneización de 12 submuestras recogidas al azar, en puntos distribuidos por toda la superficie de ensayo, de 0 cm a 20 cm de profundidad, con ayuda de una sonda holandesa. Las muestras de suelo fueron secadas en estufa, a 65°C hasta peso constante, y enviadas al laboratorio para su análisis. De todos los resultados analíticos obtenidos, han sido detallados en las fichas de las parcelas los valores medios de textura y pH del suelo.

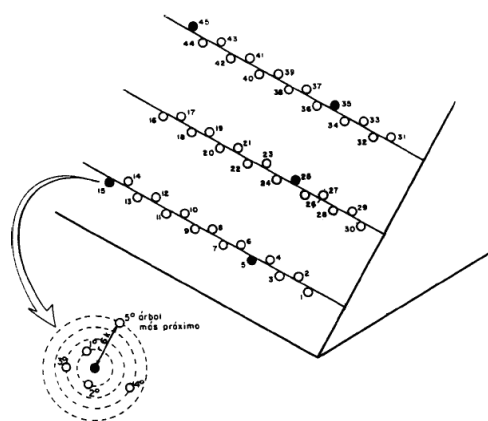
A causa de la inexistencia de estaciones meteorológicas en las masas en donde se encuentran las parcelas estudiadas, para la caracterización climática de las mismas, fueron determinados los gradientes de precipitación (P), temperatura (T) y evapotranspiración (ETP) con respecto a la altitud, a partir de los datos proporcionados por una red de 25 estaciones situadas en el mismo sector climático, siguiendo la metodología empleada en los trabajos de Carballeira *et al.* (1983) y Martínez-Cortizas *et al.* (1997), y teniendo en cuenta su localización geográfica dentro de la sectorización climática establecida por Rodríguez-Gutián (2004) para el occidente de la Cornisa Cantábrica. A partir de dichos gradientes, fueron calculados los valores medios mensual y anual de P , T y ETP , que figuran en las fichas de cada parcela.

2.2. Diseño del ensayo

2.2.1. Caracterización inicial y definición de la intensidad de poda diseñada

Previamente a la definición del sistema experimental y a la consiguiente instalación del dispositivo de parcelas permanentes empleado en el presente estudio, a finales de 2005-principios de 2006, fue realizado un primer inventario en las masas seleccionadas, de cara a obtener información previa acerca de su estado. Aunque existían en la bibliografía diversos métodos para definir la intensidad de poda (porcentaje de altura, porcentaje de copa viva, número de verticilos vivos, altura de poda, diámetro sobre muñón, etc.), no se disponía de suficiente información sobre el comportamiento del material genético de las masas de estas especies en la región por lo que se consideró necesaria la caracterización de los rodales seleccionados mediante un inventario previo. Para ello, se realizaron diversos transectos lineales, distribuidos por todas las zonas de ensayo, evaluándose un total de 50 árboles en cada uno de los rodales. En ellos, se caracterizaron el origen de la masa (plantación/regeneración natural), edad (t), altura total (h), altura de la primera rama muerta ($hIram_m$), altura de la primera rama viva ($hIram_v$), número de verticilos hasta tres metros (Nv_3), número de verticilos totales (Nv_t) y densidad (N).

Para la determinación de la densidad (N), o número de pies por hectárea, en las masas de *Pinus pinaster* procedentes de regeneración natural se adoptó el método de Muestreo de Seis Árboles (SEBAST) de Prodan (1968) modificado por Galera *et al.* (1997), según el cual cada 10 árboles a partir del N° 5, se replantea una parcela alrededor del pie central midiendo la distancia hasta el 5° árbol más próximo, r_{6k} (Figura 2.2 y Ecuación (2.1)).



$$N = 10000 \cdot (N_n / S) \quad (2.1)$$

$N_n = 5,5 \cdot n$, siendo n el número de puntos en los que se mide la espesura.

$$S = \Pi \cdot \sum_{k=1}^n r_{6k}^2$$

Figura 2.2. Muestreo de árboles para la caracterización de las parcelas de origen natural utilizando el método de Muestreo de Seis Árboles (SEBAST) de Prodan (1968) modificado. Fuente: Modificado de Galera *et al.* (1997).

Los datos derivados de este primer inventario fueron empleados para definir las características de la copa de cada sitio de ensayo con el fin de seleccionar el criterio que facilitase el posterior señalamiento de las alturas de poda en campo. Para ello, se evaluaron el número de verticilos y la distancia entre ellos en los tres primeros metros del árbol ($Dist_{v3}$), asumiendo que por lo general no se superaría dicha altura en la primera intervención. Se consideró cierta linealidad en la distribución de los verticilos a lo largo del fuste pudiendo estimar así el número de verticilos (N_{v+3}) y la distancia entre ellos ($Dist_{v+3}$) por encima de los tres metros de altura. Los datos de altura media de la primera rama viva y la primera rama muerta permitieron calcular los valores medios de verticilos muertos (N_{v_m}) y vivos (N_{v_v}) así como la distancia entre los mismos. La altura total y la altura de la primera rama viva, permitieron estimar además la longitud de copa viva de los árboles (L_{copa_v}) y la distancia entre verticilos en la copa viva ($Dist_{v_v}$) (Tabla 2.2).

Tabla 2.2. Valores medios resultantes de la caracterización inicial de las masas de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* seleccionadas.

Variable	Parcela							
	Campa	Cabada	Catalina	Fabal	Valsera	Barcia	Monteagudo	Uría
	<i>Pinus radiata</i>				<i>Pinus pinaster</i>			
t	9	7	8	10	8	11	8	7
h	7,11	8,19	6,75	8,93	5,87	5,47	3,84	4,09
$hIram_m$	39,90	31,58	24,86	42,16	73,80	34,49	13,30	42,60
$hIram_v$	95,44	80,04	78,10	119,52	158,10	87,96	65,00	122,04
h_3	4,11	5,19	3,75	5,93	2,87	2,47	0,84	1,09
L_{copa_v}	6,16	7,39	5,97	7,74	4,29	4,59	3,19	2,87
Nv_i	12,86	12,70	15,06	13,18	7,38	11,60	6,54	6,20
Nv_v	10,62	10,56	12,95	10,46	4,73	9,41	5,40	4,61
Nv_m	2,24	2,14	2,11	2,72	2,65	2,19	1,14	1,59

Tabla 2.2 (continuación). Valores medios resultantes de la caracterización inicial de las masas de *Pinus pinaster* y *Pinus radiata* seleccionadas.

Variable	Parcela							
	Campa	Cabada	Catalina	Fabal	Valsera	Barcia	Monteagudo	Uría
	<i>Pinus radiata</i>				<i>Pinus pinaster</i>			
Nv_3	7,04	8,02	8,10	6,82	5,02	7,48	5,24	3,90
Nv_{+3}	5,82	4,68	6,96	6,36	2,36	4,12	1,30	2,30
$Dist_v$	0,58	0,70	0,46	0,74	0,91	0,49	0,59	0,62
$Dist_{v3}$	0,43	0,37	0,37	0,44	0,60	0,40	0,57	0,77
$Dist_{v+3}$	0,71	1,11	0,54	0,93	1,22	0,60	0,65	0,47

donde t es la edad de la masa, en años; h es la altura total, en m; $Hlram_m$ es la altura de la primera rama muerta, en cm; $Hlram_v$ es la altura de la primera rama viva, en cm; h_{-3} es la altura total menos tres metros, en m; L_{copa_v} es la longitud de copa viva, en m; Nv_t es el número de verticilos totales; Nv_v es el número de verticilos en la copa viva; Nv_m es el número de verticilos en la copa muerta; Nv_3 es el número de verticilos en los tres primeros metros; Nv_{+3} es el número de verticilos por encima de los tres metros de altura; $Dist_v$ es la distancia entre verticilos en la copa viva, en m; $Dist_{v3}$ es la distancia entre verticilos en los tres primeros metros, en m; $Dist_{v+3}$ es la distancia entre verticilos por encima de los tres primeros metros de altura, en m; y Parcela se corresponde con el monte en el que se encuentra instalado cada ensayo.

Por último, a partir de los datos anteriores, se realizó una simulación de las intensidades de poda (en porcentaje) susceptibles de ser efectuadas en los rodales objeto de estudio, mediante la siguiente ecuación:

$$Intensidad\ poda\ diseñada = \left(\frac{L_{copa_v0} - L_{copa_v1}}{L_{copa_v0}} \right) \cdot 100 \quad (2.2)$$

donde *Intensidad poda diseñada* se corresponde con el % de copa viva eliminada; L_{copa_v0} es la longitud de copa viva en el momento inicial, antes de poda, en m; y L_{copa_v1} es la longitud de copa viva en un momento posterior, después de poda, en m.

A partir de esta simulación (Tabla 2.3), fueron seleccionados para el diseño experimental tres tratamientos de intensidad de poda para la primera intervención, correspondientes con la eliminación del 20% y 40% de L_{copa_v} permaneciendo como control los pinos en los cuales no se eliminó ningún verticilo vivo. Desde un punto de vista operacional se seleccionó el número de verticilos a mantener (Nv_r) que más se aproximara a las intensidades de poda diseñadas para cada ensayo (Tablas 2.3 y 2.4).

En base a estos valores estimados previamente (Tabla 2.3), y para evitar la realización de podas excesivas, en algunas de las parcelas de ensayo fue establecido un rango de verticilos a eliminar con el fin de establecer un criterio más conservador que permitiera decidir en campo mantener siempre más verticilos cuanto menor fuesen la altura y la longitud de copa del árbol y viceversa (Tabla 2.4).

Tabla 2.3. Simulación de la intensidad de poda (%) en función del número de verticilos a mantener (Nv_r) (rango de uno a ocho) para cada parcela de ensayo permanente estudiada, destacando las intensidades de poda del 20% (color azul) y 40% (color naranja) de copa viva (L_{copa_v}).

Nv_r	Parcela							
	Campa	Cabada	Catalina	Fabal	Valsera	Barcia	Monteagudo	Uría
	<i>Pinus radiata</i>				<i>Pinus pinaster</i>			
Situación real - <i>Antes de poda</i> (L_{copa_y0})								
Todos	6,16	7,39	5,97	7,74	4,29	4,59	3,19	2,87
Simulación - <i>Después de poda</i> (L_{copa_y1})								
1	0,71	1,11	0,54	0,93	1,22	0,6	0,646	0,47
2	1,41	2,22	1,08	1,87	2,43	1,20	1,29	0,95
3	2,12	3,33	1,62	2,80	3,65	1,80	1,94	1,42
4	2,82	4,44	2,16	3,73	-	2,40	2,58	1,89
5	3,53	5,55	2,69	4,66	-	3,00	-	2,37
6	4,24	6,66	3,23	5,60	-	3,60	-	2,84
7	4,94	-	3,77	6,53	-	4,20	-	-
8	5,65	-	4,31	7,46	-	-	-	-
Simulación - <i>Intensidad poda diseñada</i>								
1	88,47	84,98	90,95	87,97	71,56	86,93	79,75	83,62
2	77,11	69,96	81,91	75,84	43,36	73,86	59,56	66,90
3	65,58	54,94	72,86	63,82	14,92	60,78	39,18	50,52
4	54,22	39,92	63,82	51,81	-	47,71	19,12	34,15
5	42,69	24,90	54,94	39,79	-	34,64	-	17,42
6	31,17	9,88	45,90	27,65	-	21,57	-	1,05
7	19,81	-	36,85	15,63	-	8,50	-	-
8	8,28	-	27,81	3,26	-	-	-	-

donde L_{copa_y0} es la longitud de copa viva en un momento inicial, antes de poda, en m; L_{copa_y1} es la longitud de copa viva en un momento posterior a la poda, en m; *Intensidad poda diseñada* es el porcentaje de poda estimado en función de la L_{copa_y} eliminada; Nv_r es el número de verticilos que permanecen en la copa remanente; y Parcela se corresponde con el monte en el que se encuentra instalado cada ensayo.

Tabla 2.4. Número de verticilos a mantener para cada intensidad de poda diseñada (% de copa viva a eliminar) y parcela de ensayo en la primera fase experimental.

<i>Intensidad poda diseñada</i>	Parcela							
	Campa	Cabada	Catalina	Fabal	Valsera	Barcia	Monteagudo	Uría
	<i>Pinus radiata</i>				<i>Pinus pinaster</i>			
20	7	5 - 6	8 - 9	6 - 7	3 - 4	6	4	5
40	5	4	7	5	2 - 3	4 - 5	3	3 - 4

2.2.2. Diseño experimental

Una vez concluidas las simulaciones de poda, se planteó establecer los ensayos de claras y podas con un diseño factorial anidado con dos factores, en el cual el factor

principal estuviera conformado por la intensidad de clara y poda de la segunda fase, y el factor secundario por la intensidad de poda de la primera fase. A continuación se describen los criterios utilizados para definir las intensidades de cada intervención selvícola.

Intensidad de poda, definida para ser realizada en dos escalas temporales, bajo criterios diferentes (Figura 2.3):

- Primera intervención (invierno 2005-2006): porcentaje de longitud de copa viva (L_{copa_v} , en m) a eliminar, aplicable en todos los árboles del ensayo, diferenciando cuatro tratamientos, con tres intensidades de poda: tratamiento 1 - intensidad 0% de L_{copa_v} eliminada (control). Debido a la cantidad de combustible existente en los rodales objeto de intervención, se procedió a eliminar las ramas muertas en los verticilos basales para facilitar el acceso a la masa y la instalación del ensayo); tratamientos 2 y 3 - intensidad del 20% de L_{copa_v} eliminada; y tratamiento 4 - intensidad del 40% de L_{copa_v} eliminada.
- Segunda intervención (inviernos 2009-2010 y 2010-2011): aunque inicialmente estaba previsto mantener dos intensidades de poda en altura en el momento de realizar los tratamientos de clara (sobre los tratamientos 2 y 3, respectivamente), finalmente se decidió plantear un único tratamiento de poda a 6-6,5 metros de altura (h_{base} , en m) sobre los árboles de porvenir podados en la primera fase del ensayo (tratamientos 2 a 4). Fase coincidente con el momento de realización de la primera clara (invierno 2009-2010 para *Pinus radiata* e invierno 2010-2011 para *Pinus pinaster*) o en un momento posterior en función de la altura y el tamaño de la copa de los árboles a podar.

Intensidad de clara (inviernos 2009-2010 y 2010-2011), definida para ser efectuada en la segunda fase experimental del ensayo (coincidiendo con la intervención de poda o con anterioridad, en función del momento más adecuado para cada especie e intervención selvícola). Se diferenciaron tres tipos de clara:

- Sin clara (tratamiento control).
- Clara selectiva: Selección de los árboles de porvenir (mínimo 150 pies/ha) que previsiblemente llegarán al final del turno y que presenten buenas características para la obtención de madera de calidad, y eliminación de aquellos pies que compitan directamente con los árboles de porvenir seleccionados (especialmente competencia en copa).
- Clara baja fuerte: Selección de los pies dominados, muertos, enfermos, defectuosos, bifurcados, rotos o cuyas características no sean adecuadas para producir madera de calidad, que en suma supongan la extracción de aproximadamente el 30-40% del área basimétrica (G , en m^2/ha).

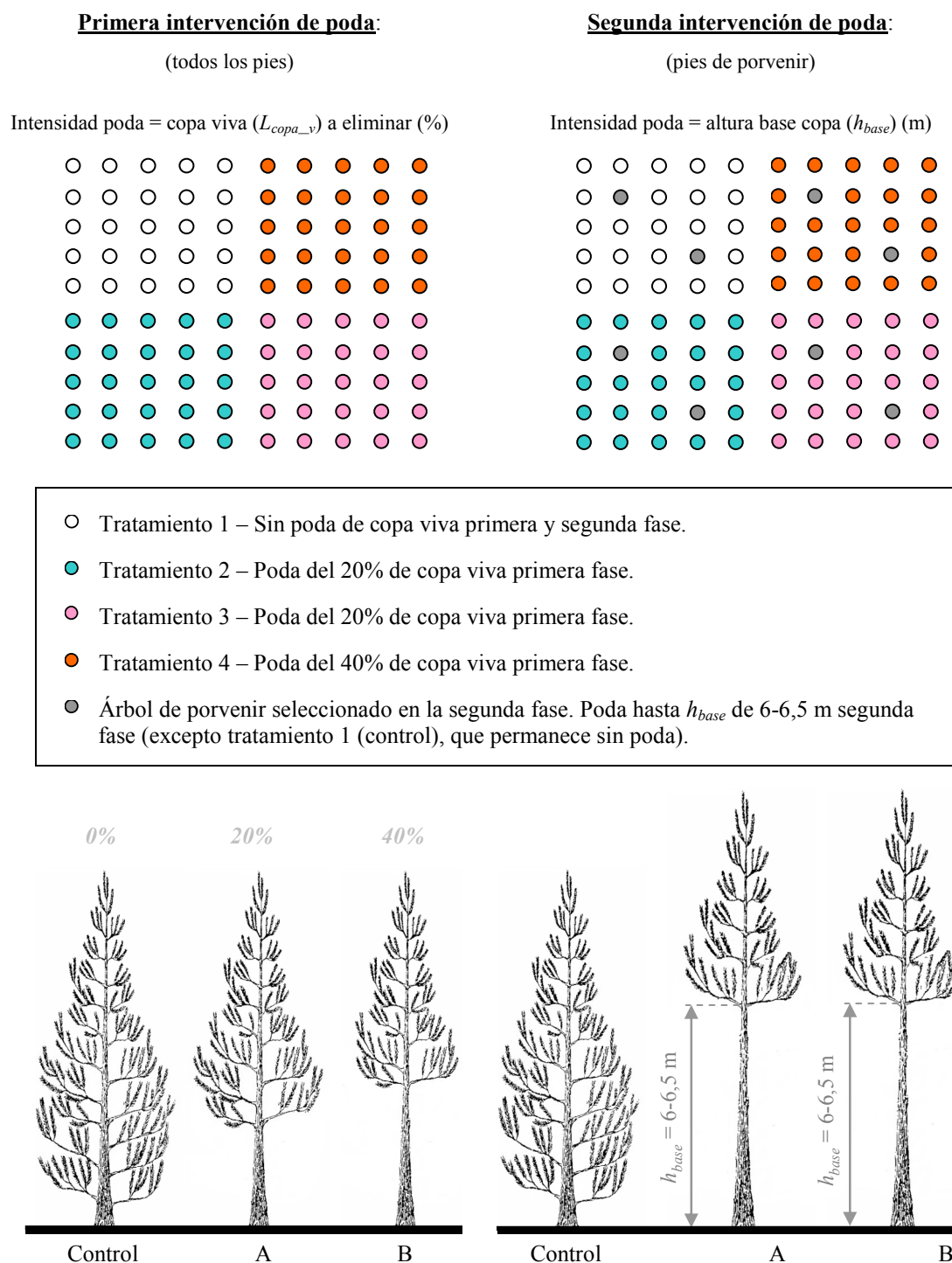


Figura 2.3. Intensidades de poda diseñadas en cada fase de intervención (arriba) y ejemplo de la poda realizada en un árbol de porvenir, en función del tratamiento en el que se encuentre (abajo): tratamiento 1, sin poda en ambas fases (árbol control); tratamientos 2 y 3, primera fase: 20% de L_{copa_v} eliminada y segunda fase: poda hasta h_{base} de 6-6,5 metros (árbol A); y tratamiento 4, primera fase: 40% de L_{copa_v} eliminada y segunda fase: poda hasta h_{base} de 6-6,5 metros (árbol B).

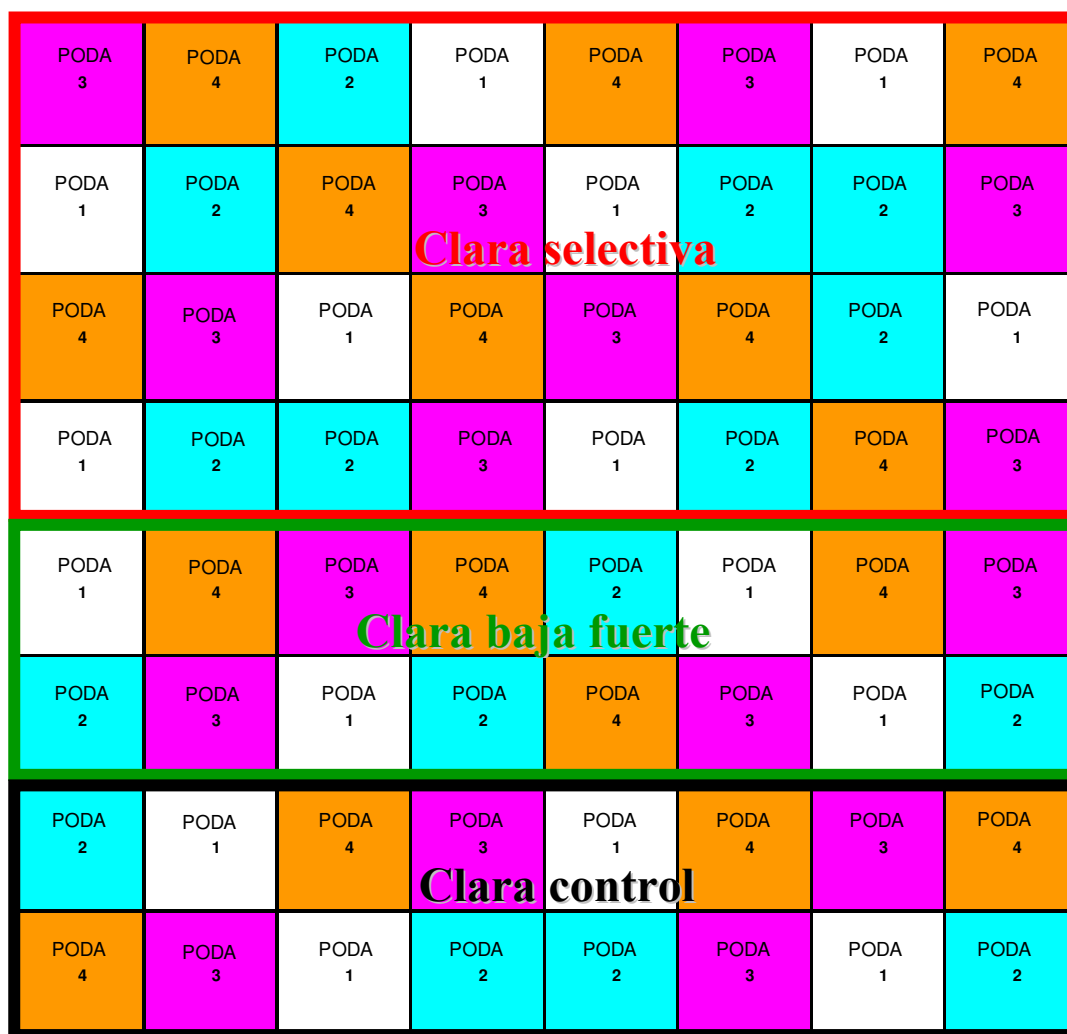


Figura 2.4. Diseño experimental de podas y claras del dispositivo de parcelas permanentes de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* estudiado en el presente trabajo.

Estos tratamientos se distribuyen espacialmente como se indica en la Figura 2.4, con tres parcelas de clara (control, selectiva y baja fuerte), dentro de las cuales se encuentran repartidos aleatoriamente los cuatro tratamientos de poda diseñados para la primera fase experimental, con un total de 64 subparcelas de poda. Cada una de las subparcelas de poda consta de nueve árboles centrales y un número variable de árboles de borde (con un promedio de 16), en función de la disposición de los pies en el terreno. El reparto de las subparcelas dentro de las parcelas de clara se corresponde con ocho repeticiones de cada intensidad de poda para la clara selectiva, cuatro para la clara baja fuerte y cuatro para el control. El tipo de masas empleadas en este estudio, no mejoradas genéticamente, y la gran variabilidad de los árboles presentes en ellas, unido a la escasez de árboles suficientes con características óptimas para la producción de madera de calidad, determinó la asignación de una mayor superficie de ensayo para la clara selectiva, con el fin de asegurar una muestra suficiente de árboles de porvenir, con una adecuada distribución espacial (Figura 2.4).

2.3. Instalación de la primera fase de los ensayos

Una vez realizado el desbroce previo para facilitar el acceso a los pies de la masa, en enero-febrero de 2006, se llevó a cabo la instalación de los ensayos en las masas seleccionadas, ocupando cada uno de ellos una superficie aproximada a una hectárea. En todas las parcelas se dispuso de la superficie suficiente para la instalación de las 64 subparcelas de poda previstas en el diseño, a excepción de uno de los sitios experimentales de *Pinus radiata*, situado en el concejo de Pravia (monte de Santa Catalina), en el que tan solo pudieron ser replanteadas 48 subparcelas de poda en el área permitida para su instalación. Tras realizar el replanteo de las parcelas, se marcaron las alturas de poda para cada árbol, manteniendo el número de verticilos definido para cada tratamiento y sitio de ensayo (Tabla 2.4). Para la eliminación de las ramas y el señalamiento de la altura de poda de los tratamientos de mayor intensidad se utilizaron escaleras ligeras de aluminio de 2,4 metros de altura (Figura 2.5, izquierda). Las intensidades de poda del 20% y 40% de L_{copa_v} eliminada fueron marcadas con spray de señalamiento forestal de distinto color para cada tratamiento, de cara a facilitar el seguimiento posterior de los ensayos. Además, para poder seguir su evolución a lo largo del tiempo, fueron numerados individualmente todos los pies mediante la colocación de chapas metálicas (árboles centrales) y plásticas (árboles de borde) a la altura de 1,30 m (medida sobre el nivel del suelo desde la parte superior de la ladera).



Figura 2.5. Señalamiento de la altura de poda (izquierda) y actividad de poda con tijera (derecha) en la primera fase experimental de un ensayo permanente de *Pinus radiata*.

Una vez marcadas las alturas de poda en cada árbol se procedió a la ejecución de las operaciones de poda a través de empresas forestales de la región, a las que se asistió previamente para garantizar el empleo de la misma metodología de trabajo e idénticos criterios de actuación. Como herramientas de poda se utilizaron tijeras de accionamiento manual, concretamente tijeras o tijerones neozelandeses (tipo “*Prun-*

off”, fabricadas por Levin Sawmakers) (Figura 2.5, derecha), diseñados casi de forma exclusiva para la poda de *Pinus radiata*. La elección de esta herramienta de poda se basó en su buena calidad del corte y eficiencia en la producción de madera libre de nudos para esta especie, siendo adquiridos modelos para distintos diámetros de rama con el fin de cubrir el mayor rango de situaciones de poda. Aun así, cuando el grosor de la rama no permitió el empleo de este tipo de tijera, se acudió al serrucho de poda.

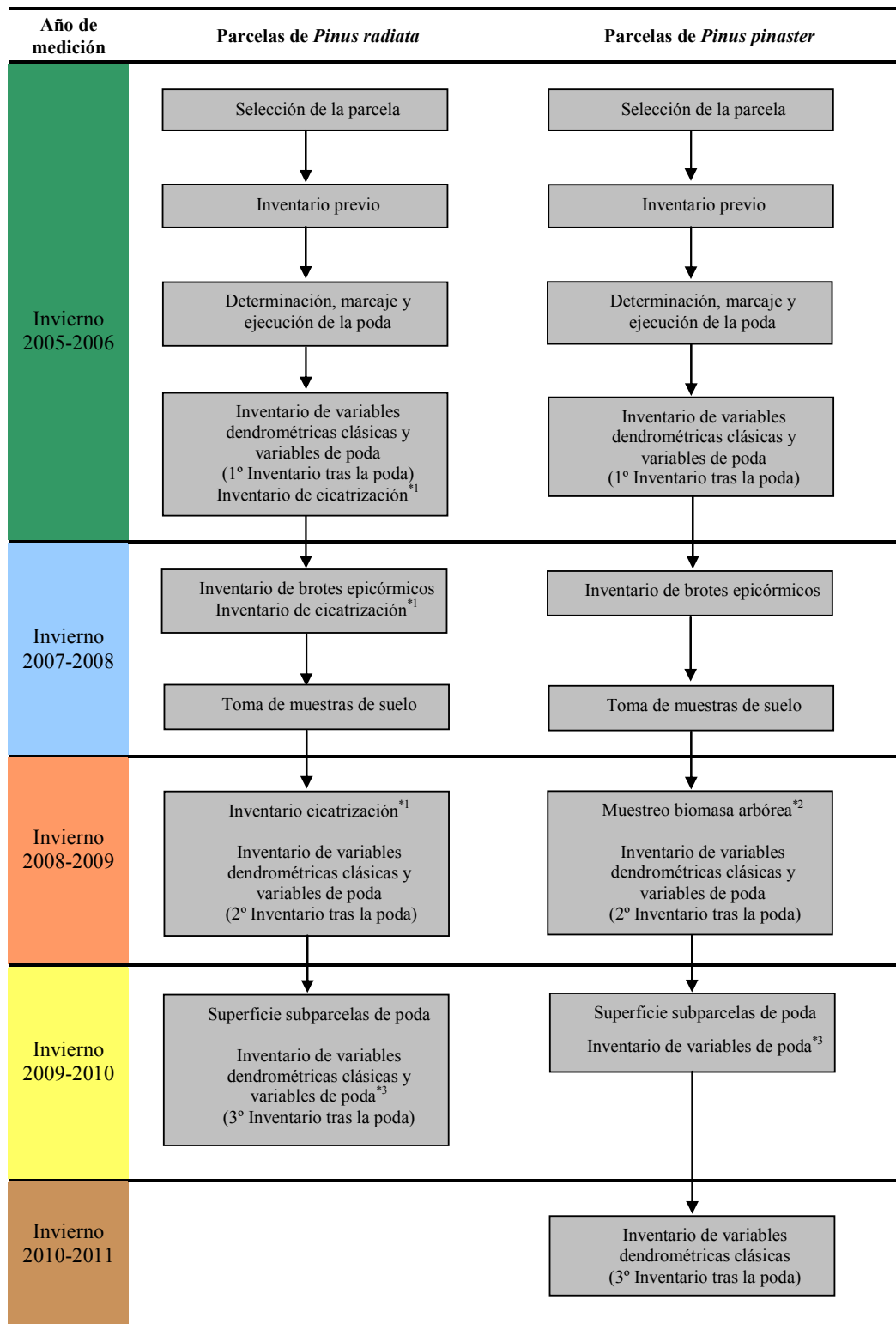
Tras dicha intervención selvícola, se trituraron los restos en las parcelas que lo permitieron, no pudiendo realizarse en algunos ensayos de origen natural de *Pinus pinaster*, en donde la distribución de los árboles dificultaba enormemente la tarea (Figura 2.6). Dado que la intensidad de poda diseñada consideraba únicamente la poda de copa viva, para facilitar la accesibilidad y toma de datos en los ensayos se procedió a eliminar, cuando se estimó oportuno, algunos verticilos inferiores muertos.



Figura 2.6. Trituración e incorporación de los restos de poda mediante desbrozadora de cadenas accionada por tractor oruga en un ensayo permanente de *Pinus radiata*.

2.4. Datos (medición de las parcelas)

La Figura 2.7 recoge de forma esquemática el cronograma de instalación de los ensayos y las mediciones de campo llevadas a cabo durante el período comprendido entre los inviernos 2005-2006 y 2010-2011 para la obtención de los datos empleados en la presente tesis, diferenciando el trabajo realizado por especie.



^{*1} Inventario de cicatrización realizado únicamente en una parcela de ensayo de *Pinus radiata* (monte de La Campa).

^{*2} Muestreo de biomasa realizado en las parcelas temporales de *Pinus pinaster*.

^{*3} Variables de poda evaluadas en una parcela de ensayo de cada especie (monte de La Campa para *Pinus radiata* y monte de Valsera para *Pinus pinaster*).

Figura 2.7. Esquema del trabajo de campo desarrollado durante el período comprendido entre los inviernos 2005-2006 y 2010-2011 para la obtención de los datos empleados en la presente tesis doctoral.

2.4.1. Inventario de variables dendrométricas clásicas y variables de poda

Una vez finalizada la primera intervención de poda en las ocho parcelas permanentes de ensayo se procedió a la realización del inventario diamétrico y de alturas de todos los pies de la masa. Los diámetros (d) fueron tomados a la altura normal (1,30 metros sobre el nivel del suelo), con dos mediciones en cruz, mediante forcípula de apreciación al milímetro (el diámetro normal se obtuvo como la media aritmética de estos dos valores). Las alturas totales (h) fueron medidas en todos los árboles, con hipsómetro digital Vertex III, hasta una precisión de un decímetro. Asimismo, en cada árbol fueron anotadas algunas variables descriptivas como el estado fisiológico o sanitario. Tres años después de la poda, en el invierno 2008-2009, fue realizado un segundo inventario de diámetros y alturas en todas las parcelas permanentes, permitiendo disponer de datos reales de crecimiento para las especies y tratamientos de poda estudiados. Por último, y coincidiendo con la realización de la segunda fase de los ensayos, en las parcelas de *Pinus radiata* (en el invierno 2009-2010) y en las de *Pinus pinaster* (en el invierno 2010-2011), fue realizado un tercer inventario diamétrico y de alturas, que fue planteado en dos fases. Inicialmente, previo a la realización de las claras, se midieron los diámetros normales (d) de todos los pies de la parcela. Las alturas totales (h) fueron medidas tras la ejecución de la clara en los individuos que permanecieron en pie tras la intervención empleando para ello un hipsómetro digital Vertex IV.

Para la caracterización de los tratamientos realizados en las ocho parcelas permanentes fueron medidas otras variables dendrométricas (de árbol individual) relacionadas con la poda. Inicialmente, una vez efectuada la primera intervención de poda, en todos los pies pertenecientes a las parcelas de ensayo fueron contabilizados los verticilos que permanecieron en la copa remanente tras la poda (Nv_r) y el número de verticilos podados (Nv_p), siendo el número de verticilos totales antes de la poda (Nv_t) el correspondiente con la suma de estos dos valores. En los nueve árboles centrales de cada subparcela de poda se contabilizó el número de ramas podadas (Nr_p), y se midieron los diámetros sobre muñón en el primer verticilo podado (DSM_i), último verticilo podado (DSM_f) y en el verticilo podado de mayor diámetro, denominado diámetro máximo sobre muñón (DSM_m). Todos estos diámetros (DSM_j) fueron medidos con dos mediciones en cruz mediante forcípula de apreciación al milímetro (el valor de cada uno de estos diámetros sobre muñón fue obtenido como la media aritmética de las dos mediciones en cruz tomadas en cada uno de ellos). Una vez realizadas las mediciones de estos verticilos se marcó su posición con ayuda de un spray de señalamiento forestal (del mismo color para el DSM_i y el DSM_f , y diferente color para el DSM_m) con el fin de facilitar su identificación y remediación en inventarios posteriores. Se midieron también las alturas de ocurrencia

de dichos diámetros sobre muñón (h_{DSMi} , h_{DSMf} y h_{DSMm}) mediante una pértiga telescópica o telescopio graduado situado verticalmente al lado del árbol, para las alturas más bajas, e hipsómetro digital Vertex III para las mayores alturas. Además, se midió la altura de la base de la copa (h_{base}) en todos los árboles y el diámetro de copa (D_{copa}) en los dos árboles más céntricos de cada subparcela de poda, empleando para ello un hipsómetro digital Vertex III de precisión decimétrica. Por último, en todos los pies centrales fueron medidos los diámetros cruzados de las cuatro heridas de poda de mayor tamaño, una de cada cuadrante del fuste podado (dr_{mi}), con ayuda de un escalímetro (el diámetro de cada herida se obtuvo como la media aritmética de las dos mediciones en cruz tomadas en cada una de ellas), y la altura sobre el nivel del suelo a la que se encontraban dichas heridas (h_{drmi}). Al igual que en el inventario diamétrico y de alturas, en todos los árboles fueron anotadas las variables descriptivas y observaciones que se considerasen oportunas (p.e. estado fisiológico y sanitario).

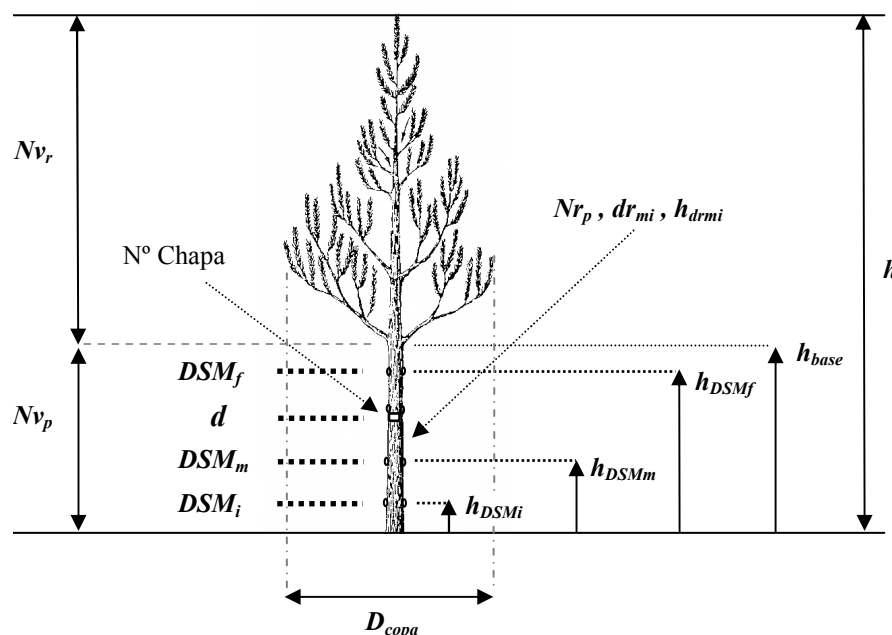


Figura 2.8. Esquema de las principales variables dendrométricas medidas en los árboles centrales de las subparcelas de poda tras la primera intervención de poda. Nv_r : número de verticilos de la copa remanente tras la poda; Nv_p : número de verticilos podados; DSM_i : diámetro sobre muñón en el primer verticilo podado; DSM_m : diámetro máximo sobre muñón; d : diámetro normal (1,30 m); DSM_f : diámetro sobre muñón en el último verticilo podado; h : altura total; h_{base} : altura de la base de la copa; h_{DSMi} : altura a la que se encuentra el DSM_i ; h_{DSMf} : altura a la que se encuentra el DSM_f ; h_{DSMm} : altura a la que se encuentra el DSM_m ; D_{copa} : diámetro de copa; Nr_p : número de ramas podadas; dr_{mi} : diámetro medio de la herida de poda de mayor tamaño del cuadrante i ; y h_{drmi} : altura a la que se encuentra la herida de poda de mayor tamaño seleccionada en el cuadrante i .

Para evaluar la evolución de la forma del fuste podado y su relación con los tratamientos de poda efectuados, tres años después de los tratamientos, en el invierno 2008-2009, fueron remedidos los diámetros sobre muñón señalados tras la

intervención (DSM_i , DSM_f , DSM_m). Los DSM_f situados a mayor altura requirieron el uso de escalera para su medición con forcípula. Asimismo, con objeto de aumentar el tamaño muestral de los diámetros sobre muñón medidos por árbol, y aprovechando la realización de la poda alta (hasta 6-6,5 metros) en los árboles de porvenir de las parcelas de *Pinus radiata*, en el invierno de 2009-2010, fueron remedidos los diámetros sobre muñón anteriores y los nuevos diámetros correspondientes con los verticilos podados en la segunda intervención de poda. La realización de estas últimas mediciones fue efectuada desde el suelo, sin necesidad de escalera, gracias a la utilización de un dendrómetro Criterion RD1000, que permite medir de forma precisa diámetros a diferentes alturas del fuste, estando el árbol en pie. Además, junto al Criterion RD1000, fue utilizado un hipsómetro digital Vertex IV para la determinación de la distancia entre el operador y el árbol, y las alturas de ocurrencia de los diámetros.

2.4.2. Seguimiento de cicatrización y aparición de brotes epicórmicos

El seguimiento del cierre de las heridas de poda fue realizado únicamente en una de las parcelas de ensayo de *Pinus radiata* (situada en el monte de La Campa), en la que habían sido señaladas con spray forestal las cuatro heridas de poda de mayor tamaño de cada cuadrante del fuste podado (dr_{mi}) en el momento inmediatamente posterior a la poda. Los inventarios de cicatrización de las heridas fueron realizados en el invierno 2005-2006, tras la realización de la poda, y en el invierno 2007-2008, dos años después de la intervención. En todos ellos se midieron los diámetros cruzados de las heridas de poda señaladas mediante escalímetro (el diámetro de cada herida se determinó como la media aritmética de las dos mediciones en cruz tomadas en cada una de ellas). Asimismo, se anotó el porcentaje de la herida cubierto de resina (clasificado en 3 categorías: 0-25%, 25-50% y 50-100%) y fueron contabilizadas las heridas de poda totalmente ocluidas (observación diferenciada en el estadillo de campo). La evaluación (diámetro, resinación y oclusión) de las heridas situadas a mayor altura fue realizada con ayuda de una escalera de aluminio de 2,4 metros de altura. Por último, fue determinada la localización en el fuste de cada herida podada mediante la altura de ocurrencia de la misma y el cuadrante al que pertenecía. Para la medición de esta altura se utilizó una pértiga telescópica o telescopio graduado, siempre que fuera posible, y Vertex III para las heridas situadas en las zonas más altas del fuste podado.

En el invierno 2007-2008 también se llevó a cabo un muestreo de los brotes epicórmicos surgidos tras la intervención. En todos los árboles de las parcelas fueron contabilizados y evaluados los brotes presentes en el fuste, para la longitud del tronco comprendida entre el primer y el último verticilo podado. Para ello, en dicha

sección del tronco, se procedió a la caracterización de cada brote. Por un lado fue evaluado el tamaño (longitud, Lbe) y grosor (diámetro, Dbe) de las formaciones epicórmicas extendidas (con tallo). El tamaño de los brotes fue medido con calibre digital para el diámetro (mm) y escalímetro o regla graduada para la longitud (cm). Por otra parte, se realizó una diferenciación de los brotes extendidos en función de su tamaño, considerando dos categorías, en función de su grosor: fino ($Dbe < 3\text{mm}$) o grueso ($Dbe > 3\text{mm}$); y otras dos, en función de su longitud: corto ($Lbe < 10\text{ cm}$) o largo ($Lbe > 10\text{ cm}$). Esta clasificación de los brotes por su diámetro en la inserción se basó en el trabajo de Deal *et al.* (2003), quienes comentaron que brotes con un diámetro aproximado de 3 mm pueden generar nudos con un tamaño importante para la calidad final de la madera producida. Por otro lado, los brotes fueron clasificados en extendidos o no extendidos, dependiendo de la longitud del brote desde el tronco, siendo considerados como extendidos aquellos brotes con un tallo visible, con longitud superior a 1 cm, y no extendidos los brotes conformados por un conjunto de acículas, con una longitud inferior a 1 cm. Otras características evaluadas en los brotes fueron su origen (nudo, entrenudo, verticilo, entre verticilos), estado fisiológico (vivo o muerto), posición en el árbol (verticilo más próximo, caracterizado desde la base hasta el último verticilo podado) y orientación (dirección cardinal: norte, sur, este, oeste).

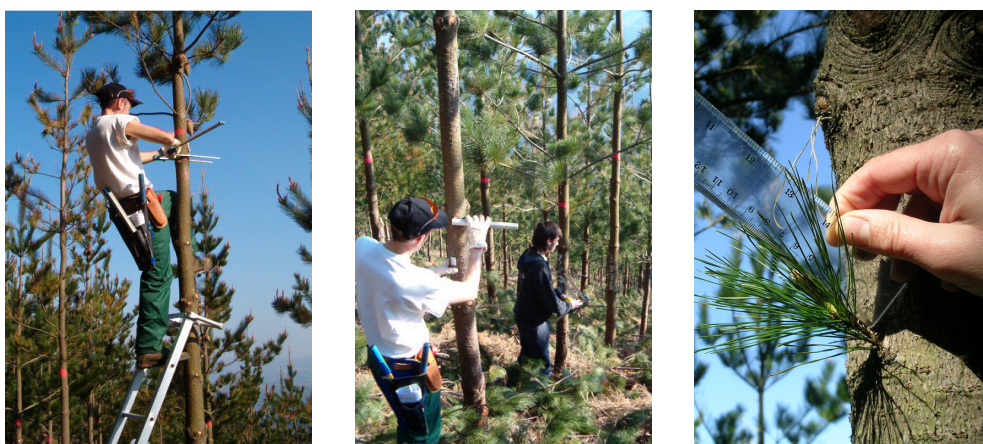


Figura 2.9. Caracterización de las parcelas permanentes de ensayo de *Pinus radiata* en los años sucesivos a la poda. De izquierda a derecha: forma del fuste (medición del diámetro sobre el último verticilo podado, DSM_f), cicatrización de las heridas de poda (medición de una de las cuatro heridas de poda de mayor tamaño, dr_{mi}) y brotes epicórmicos (medición de su longitud, Lbe).

2.4.3. Muestreo de árboles para biomasa

La determinación de la biomasa arbórea se llevó a cabo en tres masas jóvenes regulares de *Pinus pinaster*. Como ya se comentó en el apartado 2.1.1, los árboles apeados en este estudio se encontraban localizados en las proximidades de las parcelas permanentes de los montes de Valsera y Monteagudo y un tercer rodal situado en el monte de Loris. Los tres puntos de muestreo fueron establecidos en

parcelas temporales seleccionadas únicamente para este trabajo con el fin de obtener una muestra de árboles suficiente, sin requerir el apeo de pies pertenecientes a los ensayos permanentes de la red experimental de podas y claras de esta especie.

Finalmente, la muestra utilizada en este trabajo estuvo conformada por 28 árboles representativos del tipo de masa estudiado, siendo seleccionados y apeados nueve árboles en cada uno de los ensayos de Monteagudo y Valsera, y diez en el rodal instalado en el monte de Loris. El tamaño de la muestra vino determinado por la disponibilidad de recursos. Su elección se fundamentó en la distribución diamétrica, de modo que el número de árboles cortados de cada clase diamétrica fuera proporcional al porcentaje de cada una de ellas con respecto al total, para un rango diamétrico acorde con el tipo de masas estudiado. Además de este criterio, se procuró que los árboles seleccionados no estuviesen podados ni mostraran malformaciones en tronco o copa, o cualquier otro tipo de desarrollo anómalo.

Antes del apeo, en cada árbol, se realizaron mediciones del diámetro normal (d), altura total (h), altura de la base de la copa (h_{base}), altura de la base de la copa viva (h_{base_v}) y diámetro de copa (D_{copa}). Las mediciones fueron realizadas con forcípula de precisión milimétrica (d) y Vertex III de precisión decimétrica (h , h_{base} , h_{base_v} y D_{copa}). Además, se llevó a cabo una descripción del estado sanitario, posición sociológica y forma de los árboles.

Tras el apeo, se realizó una caracterización en campo del tocón, las trozas y las ramas. En cada tocón, fueron medidos los diámetros cruzados en la base y la punta (en cm), la longitud (en m) y el espesor de corteza en la punta (en mm). Las trozas se cortaron con una longitud de 1 metro hasta una altura en la que se alcanzara el valor aproximado de 4 cm de diámetro en punta delgada. Al tratarse de árboles de pequeño diámetro no se consideró la referencia habitual de 7 cm en punta delgada, ya que muchos de los árboles presentaban incluso un diámetro normal inferior o muy cercano a los 7 cm, siendo 4 cm un diámetro de referencia empleado comúnmente en estudios de biomasa de árboles de pequeño diámetro (p.e. Senelwa y Sims, 1998; Sims *et al.*, 1999 a;b; Sims *et al.*, 2001). En cada troza, fueron tomados datos de diámetro cruzado en la base y la punta (en cm), longitud (en m), espesor de corteza en la base y la punta (en cm), diámetro cruzado de los verticilos (en cm), distancia entre los verticilos (en cm) y peso de la troza y del total de acículas de la troza (en kg). En cada rama, cortada individualmente mediante tijeras de podar, se anotó el diámetro en la inserción (en mm), la longitud (en cm), el peso (en g), su estado fisiológico (viva o muerta) y posición (verticilo y troza). Los diámetros fueron medidos con forcípula, excepto las ramas que fueron medidas con calibre digital. Las longitudes y distancias se tomaron con cinta métrica, y el espesor de corteza fue medido con calibre digital. Para el pesado de las trozas se empleó un dinamómetro de precisión 50 g y para las ramas una balanza de precisión 0,01 g.

Tras la medición en campo, fue preparada una muestra de cada fracción arbórea. Para ello, fueron seleccionadas la primera rama viva y muerta (siempre que hubiera) de cada troza, que fueron separadas en acículas, ramillas (diámetros de 0-0,3 cm y de 0,3-0,6 cm), ramas finas (diámetros de 0,6-2 cm) y ramas gruesas (diámetros de 2-7 cm y mayores de 7 cm). Fueron seleccionados además cinco discos transversales, cortados a diferentes alturas del fuste (tocón, diámetro normal, comienzo de la copa, copa máxima y en un punto aleatorio de la parte superior de la copa, en el que no se hubiera cortado ninguno de los otros cuatro discos). Todas las fracciones fueron perfectamente etiquetadas para su posterior identificación, y las muestras de menor tamaño fueron empaquetadas en bolsas plásticas cerradas y selladas con cinta aislante para evitar la mayor pérdida de humedad posible.

Las muestras húmedas de las ramas, separadas por fracciones, y del fuste, diferenciadas en discos, fueron llevadas al laboratorio para su procesado y secado. Los discos fueron separados en las fracciones de madera y corteza previamente a su secado, para el cálculo del peso fresco de ambas fracciones por separado (pesadas conjuntamente en campo). El secado de las muestras en estufa a 65°C hasta peso constante permitió preparar una submuestra de cada fracción arbórea, procedente de nueve de los árboles apeados (tres árboles de cada ensayo), para el análisis nutricional de la misma. Este análisis fue externalizado a un laboratorio acreditado.

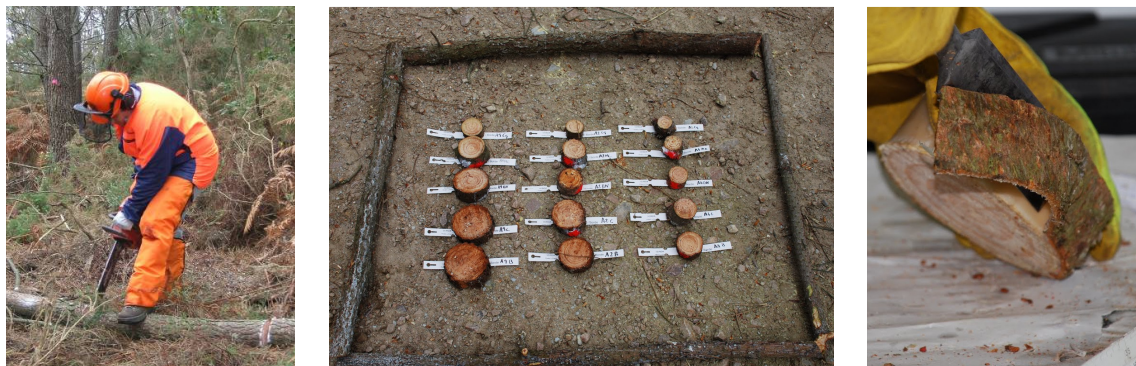


Figura 2.10. Operaciones de campo y laboratorio para la cuantificación de la biomasa arbórea aérea, total y por alturas, de las fracciones del fuste.

2.5. Elaboración de los datos

A partir de los datos comentados en el apartado anterior, se han podido determinar diversas variables de copa y fuste relacionadas con la poda, variables dendrométricas y dasométricas clásicas relacionadas con el crecimiento y producción del árbol, así como características asociadas con la estructura de la masa, la competencia o la biomasa arbórea y forestal. Todos ellos han sido empleados en los diferentes capítulos de la tesis, detallando a continuación su metodología de cálculo.

2.5.1. Variables de copa y fuste relacionadas con la poda

A partir de los datos observados en la caracterización de las parcelas de ensayo se procedió al cálculo de una serie de variables relacionadas con la intensidad de poda:

1. Longitud de copa

La longitud total de la copa fue estimada para cada árbol podado en función de la altura total y la altura de la base de la copa, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$L_{copa} = h - h_{base} \quad (2.3)$$

donde L_{copa} es la longitud total de copa, en m; h es la altura total del árbol; y h_{base} es la altura de la base de la copa, en m.

La longitud de la copa viva fue estimada de la misma forma, considerando tan solo la parte de la copa que se encontraba en estado vivo:

$$L_{copa_v} = h - h_{base_v} \quad (2.4)$$

donde L_{copa_v} es la longitud de copa viva, en m; h es la altura total del árbol, en m; y h_{base_v} es la altura de la base de la copa viva, en m.

La longitud de copa media ha sido calculada como la media aritmética de las longitudes de copa totales, en el conjunto de pies de la parcela en los que se ha medido esta variable:

$$L_{copam} = \frac{\sum_{i=1}^n L_{copai}}{n} \quad (2.5)$$

donde L_{copam} es la longitud de copa media de la parcela, en m; L_{copai} es la longitud de copa total del árbol i , en m; y n es el número de árboles en los que se midió la longitud de copa.

2. Altura de copa relativa

La altura de la base de la copa tras la poda realizada en la primera fase del ensayo resultó diferente para cada árbol podado. Por ello, y para la correcta evaluación del tratamiento de poda efectuado en cada individuo, fue determinada la altura relativa de copa, correspondiente con la altura relativa de poda, definida como:

$$hcr = \frac{h_{base}}{h} \quad (2.6)$$

donde hcr es la altura de la copa relativa; h_{base} es la altura de la base de la copa, en m; y h es la altura total del árbol, en m.

3. Relación de copa

La relación de la copa, entendida como la relación existente entre la longitud de copa y la altura total del árbol, fue utilizada también para la evaluación del tratamiento de poda efectuado. Esta variable ha mostrado gran interés en la modelización forestal, dada su buena relación con el vigor del árbol, siendo por ello una de las variables más frecuentemente utilizadas para predecir el crecimiento de los árboles (Wikoff, 1990; Biging y Dobbertin, 1992; Hasenauer y Monserud, 1996; Bravo *et al.*, 2001; Domínguez-Domínguez *et al.*, 2006). Su expresión matemática es:

$$R_{copa} = \frac{L_{copa}}{h} = \frac{h - h_{base}}{h} = 1 - hcr \quad (2.7)$$

donde R_{copa} es la relación de copa, adimensional; L_{copa} es la longitud de la copa, en m; h es la altura total del árbol, en m; h_{base} es la altura de la base de la copa, en m; y hcr es la altura de copa relativa, adimensional.

4. Índice de ramosidad BIX

El índice de ramosidad *BIX* ha sido utilizado en diversos trabajos como indicativo de los efectos del tamaño de la rama en la calidad de la madera (Inglis y Cleland, 1982; Maguire *et al.*, 1991; DeBell y Gartner 1997; Millar, 2003; Trincado, 2006; entre otros). Se define en este trabajo como el diámetro medio de las cuatro heridas de poda de mayor tamaño, una de cada cuadrante, para una longitud de troza determinada (en este caso, el largo del fuste podado).

$$BIX = \frac{dr_{m1} + dr_{m2} + dr_{m3} + dr_{m4}}{4} \quad (2.8)$$

donde *BIX* es el índice de ramosidad, en cm; y dr_{m1} , dr_{m2} , dr_{m3} y dr_{m4} se corresponden con el diámetro promedio, en cm, de la herida de poda de mayor tamaño de cada uno de los cuatro cuadrantes en que se divide el fuste.

5. Velocidad de oclusión de las heridas de poda

La velocidad de cierre de las heridas de poda fue estimada en las cuatro heridas seleccionadas para la estimación del índice de ramosidad *BIX*. Su valor se correspondió con la reducción del diámetro de la herida de poda en el tiempo evaluado, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$o_dr = \frac{dr_{mi1} - dr_{mi2}}{t_1 - t_2} \quad (2.9)$$

donde o_dr se corresponde con la velocidad de oclusión de las heridas de poda, en cm/año; dr_{mi1} es el diámetro medio aritmético de la herida del cuadrante *i* en el momento t_1 , en cm; dr_{mi2} es el diámetro medio aritmético de la herida de poda del cuadrante *i* en el momento t_2 , en cm; y t_1 y t_2 son

los momentos en los que se realizó el inventario de cicatrización (el tiempo transcurrido fue expresado en meses, siendo calculado posteriormente la velocidad de oclusión anual).

6. Perfil del fuste

Para el estudio de la forma y perfil del fuste fueron utilizados los datos de diámetro sobre muñón tomados a diferentes alturas del fuste, y de diámetro normal y altura total del árbol. Estas variables, además, fueron empleadas, de acuerdo con la siguientes expresiones matemáticas, para la estimación del diámetro relativo y la altura relativa:

$$d_r = \frac{DSM_j}{d} \quad (2.10)$$

$$h_r = \frac{h_{DSM_j}}{h} \quad (2.11)$$

donde d_r es el diámetro relativo, adimensional; DSM_j es el diámetro sobre muñón en el verticilo j , en cm; d es el diámetro normal (sin defectos) medido a la altura de 1,30 m sobre el nivel del suelo, en cm; h_r es la altura relativa, adimensional; h_{DSM_j} es la altura a la que se encuentra el DSM_j , en m; h es la altura total del árbol, en m.

7. Engrosamiento del diámetro sobre muñón

A partir de las funciones de perfil definidas para ambas coníferas en Asturias (Canga, 2008; Arias, 2009), y con los datos de diámetro sobre muñón medidos en campo, se estimó el engrosamiento debido a los muñones de poda, de acuerdo con la siguiente expresión general:

$$E_j = DSM_j - d_j \quad (2.12)$$

donde E_j es el engrosamiento en el verticilo j , en cm; DSM_j es el diámetro sobre muñón en el verticilo j , medido en campo, en cm; y, d_j es el diámetro sin defectos en el verticilo j , en cm, estimado mediante la función de perfil definida para el fuste sin defectos para *Pinus pinaster* (Arias, 2009) y *Pinus radiata* (Canga, 2008) en Asturias.

8. Forma del fuste

Los datos de diámetro sobre muñón (DSM_j) fueron utilizados, además, para el cálculo del coeficiente de forma (k), de acuerdo con la ecuación de perfil seleccionada (Y), empleando la siguiente formulación:

$$d_r = Y^k \quad (2.13)$$

donde d_r es el diámetro relativo; Y es la base de la función de perfil seleccionada; y k es el coeficiente de forma.

2.5.2. Variables dendrométricas y dasométricas clásicas

Los datos obtenidos en los sucesivos inventarios (explicados en el apartado 2.4) fueron utilizados para la caracterización de las parcelas estudiadas, determinando las siguientes variables dasométricas (valores medios por parcela) y dendrométricas (valores a la escala de árbol):

1. Edad

Al establecer todas las parcelas en masas gestionadas por la Administración, la edad (t) ha sido una variable conocida previamente de acuerdo con los datos aportados por los técnicos y personal de la guardería de la Consejería de Agroganadería y Recursos Autóctonos del Principado de Asturias, responsables de las zonas en las que se encontraban ubicadas las parcelas. Además, para contrastar este dato, fueron extraídos de árboles en pie (cuatro ó cinco árboles por parcela) cilindros de madera, lo más cerca posible del tocón, mediante barrena de Pressler, cuyos anillos fueron contabilizados para el testado de la edad.

2. Densidad

La densidad, referida al número de pies por hectárea, fue determinada a partir del número de árboles en pie, inventariados en cada parcela, y la superficie en proyección horizontal de la misma, a través de la siguiente expresión:

$$N = \frac{10.000 \cdot n}{S} \quad (2.14)$$

donde N es la densidad de la parcela, en pies/ha; S es la superficie replanteada de la parcela en proyección horizontal, en m^2 ; y n es el número de pies de la parcela.

3. Área basimétrica

El área basimétrica fue calculado como la suma de las secciones normales de todos los pies de la parcela, de acuerdo con la siguiente relación:

$$G = \frac{\Pi}{4} \cdot \sum_{i=1}^n d_i^2 \cdot \frac{10.000}{S} \quad (2.15)$$

donde G es el área basimétrica de la parcela, en m^2/ha ; d_i es el diámetro normal de cada árbol, en m ; S es la superficie en proyección horizontal de la parcela, en m^2 ; y n es el número de pies de la parcela.

4. Diámetro medio cuadrático

El diámetro medio cuadrático se corresponde con el diámetro normal del árbol de área basimétrica media de la parcela. De acuerdo con esto, su valor puede ser

determinado a partir del área basimétrica de la parcela y su densidad. También puede ser calculado como media cuadrática de los diámetros en la distribución diamétrica:

$$d_g = 100 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot G}{\Pi \cdot N}} \quad \text{ó} \quad d_g = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n}} \quad (2.16)$$

donde d_g es el diámetro medio cuadrático de la parcela, en cm; d_i es el diámetro normal del árbol i , en cm; n es el número de pies/parcela; N es el número de pies/ha; y G es el área basimétrica, en m²/ha.

5. Diámetro medio aritmético

El diámetro medio aritmético ha sido obtenido como la media aritmética de los diámetros normales de los árboles de la parcela en los que se ha medido esta variable:

$$d_m = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} \quad (2.17)$$

donde d_m es el diámetro medio de la parcela, en cm; d_i es el diámetro normal del árbol i , en cm; y n es el número de pies de la parcela en los que se midió el diámetro normal.

6. Diámetro dominante

El diámetro dominante se calcula como la media de los diámetros correspondientes a los 100 pies más gruesos por hectárea:

$$D_o = \frac{\sum_{i=1}^{n_o} d_{oi}}{n_o} \quad (2.18)$$

donde D_o es el diámetro dominante de la parcela, en cm; d_{oi} es el diámetro correspondiente al árbol dominante i , en cm; y n_o es el número de árboles dominantes medidos en la parcela, cuyo valor depende de la superficie de la misma, de forma que n_o es el entero superior del producto de $S/100$.

7. Altura media

La altura media ha sido calculada como la media aritmética de las alturas totales de los pies de la parcela en los que se ha medido esta variable:

$$h_m = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n} \quad (2.19)$$

donde h_m es la altura media de la parcela, en m; h_i es la altura total del árbol i , en m; y n es el número de árboles en los que se midió la altura total.

8. Altura dominante

Existen diversas definiciones de la altura dominante en la bibliografía forestal. De todas ellas, una de las más empleadas ha sido la definición de Assmann (1970), quien define la altura dominante como la obtenida al entrar con el diámetro medio cuadrático de los 100 pies más gruesos por hectárea en la relación altura-diámetro ajustada a la parcela. Esta definición habitualmente se modificada de manera que la altura dominante de Assmann se calcula como la media aritmética de las alturas de los 100 pies más gruesos por hectárea. En esta tesis, la altura dominante ha sido calculada de acuerdo con esta última definición, a partir de los datos de los pies dominantes medidos en cada sitio de ensayo:

$$H_o = \frac{\sum_{i=1}^{n_o} h_{oi}}{n_o} \quad (2.20)$$

donde H_o es la altura dominante de la parcela, en m; h_o es la altura total del árbol dominante i , en m; y n_o es el número de árboles dominantes medidos en cada parcela, cuyo valor depende de la superficie de la misma, de tal forma que n_o es el entero superior del producto de $S/100$.

9. Índice de Hart-Becking

El índice de Hart-Becking mide la relación de la distancia media entre pies y la altura dominante. La distancia media entre un pie y los árboles más próximos a éste es conocida como espaciamiento medio, expresado en metros. El valor del índice de Hart-Becking fue determinado en porcentaje a partir de la densidad (N , en pies/ha) y la altura dominante (H_o , en m), en función de la distribución espacial de los árboles (marco real o tresbolillo) de acuerdo con las siguientes expresiones:

Disposición espacial en marco real (masa artificial):
$$IH = \frac{10.000}{\sqrt{N} \cdot H_o} \quad (2.21)$$

Distribución en tresbolillo (masa natural):
$$IH = \frac{\sqrt{20.000}}{\sqrt{N} \cdot \sqrt{3}} \cdot \frac{100}{H_o} \quad (2.22)$$

donde IH es el índice de Hart-Becking, en %; H_o es la altura dominante, en m; y N es el número de pies/ha.

10. Estimación de alturas no inventariadas

La determinación de la altura total, junto con el diámetro normal, resulta clave en cualquier inventario forestal. Para reducir costes y dificultad en el trabajo de campo de un inventario forestal es habitual la medición del diámetro normal de todos los pies y las alturas de una muestra de árboles. En estos casos, la altura pasa a ser estimada mediante ecuaciones que consideran variables dendrométricas y

dasométricas obtenidas a partir del inventario. Cuando la altura es calculada en función de su diámetro normal, mediante modelos lineales o no lineales, se habla de curvas altura-diámetro locales (Prodan *et al.*, 1997). En el caso de incluir variables de árbol y de masa para la estimación de la altura, las funciones son denominadas ecuaciones altura-diámetro generalizadas, que presentan la ventaja de considerar las posibles variaciones de la altura en función del estado de la masa.

En este trabajo se han tratado de medir las alturas de todos los árboles en los dos primeros inventarios realizados en las parcelas permanentes de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster*. Sin embargo, en el tercer inventario efectuado en los ensayos de *Pinus radiata*, coincidente con la segunda fase experimental, fueron medidas únicamente las alturas de los árboles que permanecieron en pie tras la clara. Por ello, y para poder utilizar las alturas de todos los pies en el estudio del crecimiento recogido en el capítulo 5, se decidió utilizar una ecuación altura-diámetro generalizada, que presentase un buen comportamiento en las dos especies estudiadas, y cuyos parámetros fuesen específicos para cada inventario y parcela de ensayo. Fueron comparados varios modelos de altura-diámetro generalizados empleados recientemente en masas de coníferas del noroeste peninsular: Mønness (1982), Schnute (1981), Sharma y Parton (2007), Tomé (1988), y Krumland y Wensel (1988), y modelos lineal, exponencial y potencial con la altura dependiente de las variables d , d_g y H_o . Las ecuaciones probadas fueron ajustadas mediante el procedimiento MODEL del paquete estadístico SAS/ETS® (SAS Institute Inc., 2004a). Tras analizar dichos modelos, en función de los resultados de los estadísticos de bondad de ajuste (coeficiente de determinación ajustado, R^2_{adj} , y raíz cuadrada del error medio cuadrático, $REMC$) y del análisis gráfico de los residuos, se optó por emplear el modelo de altura-diámetro generalizado de Mønness (1982), cuya expresión matemática es:

$$h = 1,3 + a_0 \cdot \left[\left(\frac{1}{d} - \frac{1}{D_0} \right) + \left(\frac{1}{H_0 - 1,3} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{-3} \quad (2.23)$$

donde h es la altura total del árbol, en m; d es el diámetro normal del árbol, en cm; H_0 es la altura dominante, en m; y D_0 es el diámetro dominante, en cm.

En la Tabla 2.5 se muestran los valores resultantes para el parámetro a_0 de la Ecuación (2.23) y los estadísticos de bondad de ajuste obtenidos para cada parcela permanente de ensayo e inventario. Todos los parámetros resultaron altamente significativos ($p < 0,0001$).

Tabla 2.5. Valores del parámetro a_0 y estadísticos de ajuste del modelo altura-diámetro generalizado de Mønnes (1982) para cada inventario realizado en las parcelas permanentes de ensayo de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster*.

<i>Inv</i>	Especie	Parcela	Parámetro a_0	<i>REMC</i>	R^2_{adj}
1	<i>Pinus radiata</i>	Campa	1,407095	0,8771	0,7050
		Cabada	1,186387	0,9724	0,6736
		Catalina	1,311343	0,6952	0,5968
		Fabal	1,676193	1,6334	0,6904
	<i>Pinus pinaster</i>	Valsera	0,947673	0,8306	0,6609
		Barcia	1,285404	0,5782	0,7908
		Monteagudo	0,851476	0,5200	0,5841
		Uría	1,019418	0,4396	0,6968
2	<i>Pinus radiata</i>	Campa	1,341614	1,2281	0,5933
		Cabada	1,293714	1,3374	0,6049
		Catalina	1,269041	1,0104	0,6015
		Fabal	1,756049	1,9775	0,6305
	<i>Pinus pinaster</i>	Valsera	1,100835	1,0201	0,5438
		Barcia	1,306926	0,7131	0,5167
		Monteagudo	1,267581	0,6284	0,5085
		Uría	1,218943	0,6202	0,5827
3	<i>Pinus radiata</i>	Campa	1,410697	1,3755	0,6239
		Cabada	1,582339	1,4506	0,6489
		Catalina	1,281383	1,1460	0,5680
		Fabal	1,865619	2,1509	0,6183
	<i>Pinus pinaster</i>	Valsera	1,048628	1,4043	0,4534
		Barcia	1,195615	0,9907	0,6870
		Monteagudo	1,354132	0,7250	0,5053
		Uría	1,262877	0,7460	0,5032

donde *Inv* es el código de inventario (1-invierno 2005-2006 después de poda; 2-invierno 2008-2009; 3- invierno 2009-2010 después de clara y poda alta en *P. radiata* e invierno 2010-2011 después de clara en *P. pinaster*); a_0 es el parámetro estimado para el modelo de altura-diámetro ajustado; *REMC* es la raíz cuadrada del error medio cuadrático; y R^2_{adj} es el coeficiente de determinación ajustado.

11. Estimación del volumen unitario y cubicación de la masa

La producción unitaria de cada árbol (v , en m^3) fue determinada a partir de la ecuación de volumen del modelo de Fang *et al.* (2000), empleando para ello los valores de los parámetros obtenidos por Canga (2008) y Arias (2009) para árboles de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster*, respectivamente, en Asturias (Tabla 2.6).

Tabla 2.6. Ecuaciones de estimación del volumen unitario determinadas por Canga (2008) y Arias (2009) en base al modelo de Fang *et al.* (2000) para *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* en Asturias.

Especie	Modelo	REMC	R^2	
<i>Pinus radiata</i>	$v = 0,00005955 \cdot d^{1,879} \cdot h^{0,9253}$	1,373	0,9892	(2.24)
<i>Pinus pinaster</i>	$v = 0,00006120 \cdot d^{1,890} \cdot h^{0,918}$	1,200	0,9890	(2.25)

donde v es el volumen con corteza del árbol, en m^3 ; d es el diámetro normal del árbol, en cm; h es la altura total del árbol, en m; $REMC$ es la raíz cuadrada del error medio cuadrático, en m^3 ; y R^2 es el coeficiente de determinación.

La cubicación de la masa fue estimada a partir de tarifas de cubicación de masa, expresiones matemáticas que permiten estimar el volumen total o maderable de una masa o un grupo de árboles, mediante el uso de una o más variables dasométricas de fácil medición. Estas expresiones son imprescindibles para evaluar la producción comercial de madera de una masa forestal (Sánchez-Rodríguez, 2001).

Debido a la falta de datos de volumen en las masas (por apeo y cubicación de árboles tipo) no se pudo ajustar una ecuación propia para las masas estudiadas, siendo empleadas para el cálculo del volumen las ecuaciones definidas por Canga (2008) y Barrio-Anta y Cámara-Obregón (2008) para masas de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster*, respectivamente, en Asturias (Tabla 2.7).

Tabla 2.7. Ecuaciones para la cubicación de masas de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* en Asturias determinadas por Canga (2008) y Barrio-Anta y Cámara-Obregón (2008), respectivamente.

Especie	Modelo	REMC	R^2	R^2_{adj}
<i>Pinus radiata</i>	$V = 0,5366 \cdot G^{0,9762} \cdot H_0^{0,8959}$	16,15	0,9932	(2.26)
<i>Pinus pinaster</i>	$V = 0,000016 \cdot d_g^{2,236101} \cdot H_0^{0,834983} \cdot N^{1,04867}$	18,57	0,9879	(2.27)

donde V es el volumen maderable con corteza, en m^3/ha ; d_g es el diámetro medio cuadrático, en cm; H_0 es la altura dominante, en m; N es la densidad, en número de pies/ha; G es el área basimétrica, en m^2/ha ; $REMC$ es la raíz cuadrada del error medio cuadrático, en m^3/ha ; R^2 es el coeficiente de determinación y R^2_{adj} es el coeficiente de determinación ajustado.

12. Estimación del crecimiento corriente y acumulado en diámetro y altura

Los crecimientos corrientes en diámetro y altura de cada árbol fueron estimados en función del crecimiento total de la variable a modelizar durante el intervalo de tiempo transcurrido entre dos inventarios, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$y' = ic_y = \frac{y_2 - y_1}{t_2 - t_1} \quad (2.28)$$

donde y' o ic_y se corresponden con el incremento anual de la variable a modelizar (DSM_j , en cm; d , en cm; h , en m), y_2 es la variable a modelizar a la edad t_2 (años); e y_1 es la variable a modelizar a la edad t_1 (años).

Los crecimientos acumulados fueron estimados a partir del incremento medio anual producido para las variables de diámetro y altura en cada inventario.

13. Índice de sitio

El índice de sitio (IS) fue obtenido a partir de los sistemas de calidad de estación contruidos para *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* en Asturias (Canga, 2008 y Álvarez-Álvarez *et al.*, 2011, respectivamente).

La ecuación utilizada para *Pinus radiata* fue definida por Canga (2008) a partir de datos de análisis de tronco de 119 árboles dominantes obtenidos en 60 parcelas. En este estudio fueron probadas cuatro ecuaciones dinámicas, siendo elegida la formulación GADA basada en la ecuación de Bertalanffy-Richards, $Y = a_1 \cdot (1 - \exp(-a_2 \cdot t))^{a_3}$, con dos parámetros dependientes de la estación. La formulación final de la ecuación del índice de sitio es:

$$IS = H_0 \cdot \left[\frac{1 - \exp(-0,05274 \cdot 20)}{1 - \exp(-0,05274 \cdot t)} \right]^{(-3,161+17,90/X_0)}, \text{ con} \quad (2.29)$$

$$X_0 = \frac{1}{2} \cdot \left((\ln(H_0) + 3,161 \cdot L_0) + \sqrt{(\ln(H_0) + 3,161 \cdot L_0)^2 - 71,60 \cdot L_0} \right)$$

$$L_0 = \ln[1 - \exp(-0,05274 \cdot t)]$$

donde IS es el índice de sitio de la parcela (altura dominante a la edad de referencia de 20 años), en m; H_0 es la altura dominante de la parcela, en m; y t es la edad de la parcela, en años.

Para *Pinus pinaster* se empleó la ecuación de Álvarez-Álvarez *et al.* (2011), quienes emplearon datos de análisis de tronco de 143 árboles dominantes apeados en 70 parcelas. De las seis ecuaciones dinámicas probadas en este trabajo, la expresión con mejores resultados fue la obtenida mediante la formulación ADA del modelo de Hossfeld, $Y = a_1 / (1 + a_2 \cdot t^{-a_3})$, con un parámetro dependiente de la estación (resuelto para el parámetro a_2). La expresión final de la ecuación del índice de sitio es la siguiente:

$$IS = \frac{41,40118}{\left(1 - \left(1 - \frac{41,40118}{H_0} \right) \cdot \left(\frac{t}{20} \right)^{1,325387} \right)} \quad (2.30)$$

donde IS es el índice de sitio de la parcela (altura dominante a la edad de referencia de 20 años), en m; H_0 es la altura dominante de la parcela, en m; y t es la edad de la parcela, en años.

14. Resumen de variables dasométricas

La Tabla 2.8 recoge las principales características dasométricas de las parcelas evaluadas, para los diferentes inventarios efectuados durante el tiempo de estudio.

Tabla 2.8. Promedios de las características dasométricas de las parcelas de ensayo utilizadas en la presente tesis doctoral, para los diferentes inventarios realizados.

<i>Inv</i>	<i>Parcela</i>	<i>t</i>	<i>N</i>	<i>G</i>	<i>d_g</i>	<i>d_m</i>	<i>D₀</i>	<i>h_m</i>	<i>H₀</i>	<i>V</i>	<i>IH</i>
1	Campa	9	1.187	12,49	11,58	11,10	17,26	7,35	9,41	57,80	30,85
	Cabada	7	1.261	11,77	10,90	10,46	14,00	7,65	8,86	54,84	31,80
	Catalina	8	1.440	13,58	10,96	10,66	15,68	6,30	7,60	62,98	34,69
	Fabal	10	1.356	17,86	12,95	12,22	18,22	8,92	11,57	113,77	23,47
	Valsera	8	1.352	6,42	7,78	7,27	12,92	5,76	7,72	22,24	29,13
	Barcia	11	1.379	12,49	10,74	10,10	16,80	5,79	7,46	46,77	29,48
	Monteagudo	8	1.670	4,89	6,10	5,74	10,25	4,00	5,07	14,18	39,43
	Uría	7	1.802	6,65	6,85	6,60	10,50	4,46	5,54	23,14	34,69
2	Campa	12	1.187	22,25	15,45	14,92	22,27	10,58	12,89	129,87	22,53
	Cabada	10	1.261	21,90	14,87	14,31	18,92	10,45	11,91	126,73	23,64
	Catalina	11	1.438	28,54	15,89	15,43	22,61	10,65	12,63	197,37	20,89
	Fabal	13	1.349	26,08	15,69	14,88	21,78	11,60	14,82	196,62	18,37
	Valsera	11	1.349	15,31	12,02	11,53	18,44	7,89	9,68	71,70	22,96
	Barcia	14	1.379	21,06	13,94	13,34	20,77	7,65	9,35	101,34	23,51
	Monteagudo	11	1.670	17,88	11,68	11,38	16,51	6,49	7,67	85,48	26,05
	Uría	10	1.750	13,22	9,81	9,59	13,90	6,36	7,65	65,44	25,52
	Loris	14	1.450	25,77	15,05	14,55	19,42	12,75	14,95	135,85	14,34
3	Campa	13	1.179	25,28	16,53	15,91	23,67	11,85	14,54	163,98	20,03
	Cabada	11	1.261	25,70	16,11	15,51	20,47	11,79	13,82	169,22	20,38
	Catalina	12	1.438	32,20	16,89	16,32	24,46	12,13	14,59	252,77	18,08
	Fabal	14	1.345	28,58	16,45	15,57	22,96	12,90	16,82	240,76	16,21
	Valsera	13	1.348	22,32	14,52	13,91	21,93	9,95	11,94	130,20	18,63
	Barcia	16	1.379	27,30	15,87	15,24	23,33	9,14	10,86	153,51	20,24
	Monteagudo	13	1.618	26,01	14,30	13,93	20,78	8,22	9,82	160,12	20,66
	Uría	12	1.740	18,19	11,53	11,30	16,04	7,87	9,38	110,90	20,87

donde *Inv* es el código de inventario (1-invierno 2005-2006 después de poda; 2-invierno 2008-2009; 3- invierno 2009-2010 después de clara y poda alta en *P. radiata* e invierno 2010-2011 después de clara en *P. pinaster*); *Parcela* es el monte en el que se encuentra situado el ensayo (Campa, Cabada, Catalina y Fabal para *P. radiata*; Valsera, Barcia, Monteagudo y Uría para *P. pinaster*) (ver apartado 2.1 y anexo); *t* es la edad, en años; *N* es la densidad, en pies/ha; *G* es el área basimétrica, en m²/ha; *d_g* es el diámetro medio cuadrático, en cm; *d_m* es el diámetro medio aritmético, en cm; *D₀* es el diámetro dominante, en cm; *h_m* es la altura media, en m; *H₀* es la altura dominante, en m; *V* es el volumen maderable con corteza, en m³/ha; e *IH* es el índice de Hart Becking, en %.

2.5.3. Fracciones de biomasa

A partir de los datos tomados en campo y laboratorio (explicados en el apartado 2.4.3) fueron determinados los pesos secos, para el árbol completo y por alturas, de las distintas fracciones arbóreas consideradas (acículas, ramillas de 0-0,3 cm y de 0,3-0,6 cm, ramas finas de 0,6-2 cm, ramas gruesas de 2-7 cm y mayores de 7 cm, madera y corteza). De todos estos elementos arbóreos, las ramillas fueron agrupadas en una única fracción (de 0-0,6 cm), y las ramas gruesas mayores de 7 cm no pudieron ser analizadas por falta de esta fracción en los árboles de la muestra. En todos los componentes, fue determinado inicialmente el peso fresco, estimando posteriormente su peso seco a partir de las muestras llevadas al laboratorio.

1. Árbol completo

La determinación del peso fresco de las fracciones finas de la copa (ramas finas, ramillas y acículas) se llevó a cabo mediante la estimación de los pesos frescos de cada fracción considerada, dentro de la muestra de ramas inferiores a 2 cm:

$$P_i = \frac{p_i}{p_{rf} + p_{rm} + p_{ac}} \cdot P_{r2} \quad (2.31)$$

donde P_i es el peso fresco total en monte de la fracción i (ramas finas, ramillas o acículas), en kg; p_i es el peso fresco de la fracción i en la muestra, en g; p_{rf} es el peso fresco de rama fina en la muestra, en g; p_{rm} es el peso fresco de ramillas en la muestra, en g; p_{ac} es el peso fresco de acículas en la muestra, en g; y P_{r2} es el peso fresco total en monte de las ramas inferiores a 2 cm, en kg.

El peso fresco total de las fracciones madera y corteza fue estimado a partir de las muestras de discos llevadas al laboratorio:

$$P_i = \frac{p_i}{p_m + p_c} \cdot P_f \quad (2.32)$$

donde P_i es el peso fresco total en monte de la fracción i (madera o corteza), en kg; p_i es el peso fresco de la fracción i en la muestra, en g; p_m es el peso fresco de madera en la muestra, en g; p_c es el peso fresco de corteza en la muestra, en g; y P_f es el peso fresco total en monte del fuste, en kg.

Para el cálculo del peso seco total de cada fracción (acículas, ramillas, ramas finas, ramas gruesas, madera y corteza), fue determinada previamente la humedad de cada una de ellas, a partir de los pesos fresco y seco de las mismas en la muestra:

$$W_i = \frac{P_i}{1 + Hd_i}, \text{ con } Hd_i = \frac{p_i - w_i}{w_i} \quad (2.33)$$

donde W_i es el peso seco total de la fracción i (acículas, ramillas, ramas finas, ramas gruesas, madera o corteza), en kg; P_i es el peso fresco total en monte de la fracción i , en kg; Hd_i es la humedad de la muestra de la fracción i , en tanto por uno; p_i es el peso fresco de la fracción i en la muestra, en g; y w_i es el peso seco de la fracción i , tras su secado en estufa, en g.

Para las ramas gruesas, una vez tomado el peso en verde para el total de la fracción en el árbol y la muestra, fue determinada la humedad de la muestra, tras su secado en estufa, y finalmente fue calculado el peso seco total en el árbol en función del peso fresco y la humedad en tanto por uno de la muestra.

2. Árbol por alturas

La minuciosa toma de datos llevada a cabo en campo, considerando cada rama, verticilo y troza (tal y como se detalla en el apartado 2.4.3), permitió la determinación del peso seco total de cada fracción arbórea (madera, corteza, ramas finas, ramillas, ramas gruesas y acículas) por alturas.

La estimación de los pesos frescos de cada componente arbóreo dentro de cada rama fue realizada a partir de las ramas muestra llevadas a laboratorio, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$p_{ij} = \frac{p_{im}}{p_{im}} \cdot p_{ij} \quad (2.34)$$

donde p_{ij} el peso fresco en monte de la fracción i considerada en la rama j , en g; p_{im} es el peso fresco de la fracción i considerada en la rama muestra, en g; p_{im} es el peso fresco total de la rama muestra, en g; y p_{ij} es el peso fresco total de la rama j en monte, en g.

Los pesos secos fueron igualmente determinados a partir de las ramas muestra:

$$w_{ij} = p_{ij} \cdot \frac{w_{im}}{p_{im}} \quad (2.35)$$

donde w_{ij} es el peso seco de la fracción considerada i en la rama j , en g; p_{ij} es el peso fresco total en monte de la fracción considerada i en la rama j , en g; w_i es el peso seco de la fracción considerada i en la rama muestra, tras su secado en estufa, en g; y p_{im} es el peso fresco de la fracción considerada i en la rama muestra, en g.

Finalmente fueron determinados todos los pesos secos de cada fracción considerada (ramas, ramillas y acículas), para el conjunto de ramas de cada verticilo:

$$W_{iv} = \sum_{j=1}^n w_{ij} \quad (2.36)$$

donde W_{iv} es el peso seco total de la fracción considerada i (ramas, ramillas y acículas) en el verticilo, en g; w_{ij} es el peso seco de la fracción considerada i en la rama j ($j=1$ a n ; n es el número de ramas del verticilo).

Los pesos frescos de madera y corteza a lo largo del fuste fueron estimados a partir de los discos tomados a diferentes alturas del fuste, y llevados posteriormente a laboratorio. Para ello, fueron determinados los volúmenes de los discos y de las secciones de las trozas hasta cada verticilo, empleando la fórmula de Smalian

(Ecuación (2.37)) para la cubicación de las trozas y la fórmula de volumen del cono (Ecuación (2.38)) para el raberón, de acuerdo con las siguientes expresiones:

$$V_i = \frac{\pi}{32} \cdot [(db_{i1} + db_{i2})^2 + (dp_{i1} + dp_{i2})^2] \cdot l_i \quad (2.37)$$

donde V_i es el volumen de la sección i considerada (secciones de la troza delimitadas por los verticilos o discos muestra), en cm^3 ; db_i son los diámetros tomados en cruz en la base de la sección i considerada, en cm; dp_i son los diámetros tomados en cruz en la punta de la sección i considerada, en cm; y l_i es la longitud de la sección i considerada, en cm.

$$V_r = \frac{\pi}{48} \cdot (db_{i1} + db_{i2})^2 \cdot l_r \quad (2.38)$$

donde V_r es el volumen del raberón, en cm^3 ; db_i son los diámetros tomados en cruz en la base del raberón (el diámetro en la punta es 0), en cm; y l_r es la longitud del raberón, en cm.

A continuación, fue calculada la densidad de la madera del fuste por alturas, a partir del peso fresco y volumen de los discos tomados a lo largo del tronco. Esta densidad fue utilizada para la estimación del peso húmedo de la sección de la troza hasta el verticilo considerado, mediante la multiplicación de la densidad estimada en el disco de muestra más cercano y el volumen de dicha sección de la troza. Tras ser separados los componentes de madera y corteza de los discos muestreados, fue determinado el porcentaje de peso húmedo de cada uno de ellos. Estos porcentajes fueron aplicados para la estimación del peso húmedo de cada fracción del fuste en la sección considerada. Finalmente, tras el secado de la madera y corteza de los discos, se determinó la humedad correspondiente con cada componente, y se aplicó dicha humedad para la determinación de los pesos secos de madera y corteza de la sección de troza considerada, de acuerdo con la Ecuación (2.33) (al tratarse de secciones más pequeñas se trabajó en g en lugar de kg).

Los valores de biomasa o peso seco de cada fracción arbórea (madera, corteza, ramas finas, ramillas, ramas gruesas y acículas) por alturas fueron determinados como la biomasa acumulada de cada fracción a lo largo del fuste desde la base hasta cada metro de altura, identificado por su diámetro y altura, pudiendo estimar así la biomasa hasta una altura o diámetro determinado del árbol.

2.5.4. Caracterización de la estructura de la masa y la competencia

1. Índices de competencia

Se determinaron algunos indicadores de competencia independientes de la distancia para su inclusión en los modelos de crecimiento individual en diámetro y altura definidos en este trabajo (capítulo 5) así como su relación con la velocidad de cierre de las heridas de poda (capítulo 3). Se consideraron índices de competencia sencillos, como las variables dasométricas de densidad (N), área basimétrica (G) e

índice de Hart-Becking (*IH*), anteriormente explicadas, y la relación existente entre diversas variables dentro y dasométricas:

$$Rd_g = \frac{d}{d_g} \quad (2.39)$$

$$Rd_m = \frac{d}{d_m} \quad (2.40)$$

$$RBA = \left(\frac{g}{G} \right)^{d/d_g} \quad (2.41)$$

$$RD_0 = \frac{d}{D_0} \quad (2.42)$$

$$RG = \frac{g}{G} \quad (2.43)$$

$$BAL_{rel} = \frac{BAL_i}{G}, \text{ con } BAL_i = \frac{\pi}{4} \cdot \sum d_{mayor}^2 \cdot \frac{10000}{S} \quad (2.44)$$

donde Rd_g es el cociente entre el diámetro normal del árbol (d), en cm, y el diámetro medio cuadrático de la parcela (d_g), en cm; Rd_m es el cociente entre el diámetro normal del árbol (d), en cm, y el diámetro medio de la parcela (d_m), en cm; RD_0 es el cociente entre el diámetro normal del árbol (d), en cm, y el diámetro dominante de la parcela (D_0), en cm; RG es el cociente entre la sección normal del árbol (g), en m², y el área basimétrica de la parcela (G), en m²/ha; RBA es el ratio entre sección normal del árbol-área basimétrica y diámetro normal-diámetro medio cuadrático; BAL_{rel} es el BAL relativo. Toma valores entre 0 y 1 (Vanclay, 1991); BAL_i es la suma del área basimétrica de los árboles más gruesos, en m²/ha. Índice definido por Wykoff *et al.* (1982), con siglas procedentes de su definición en inglés “*Basal Area of the Larger trees*”; d_{mayor} es el diámetro normal de los árboles mayores que el árbol objetivo, en m; y S es la superficie de la parcela, en m².

Los índices de competencia fueron determinados para cada una de las subparcelas de poda definidas en la primera fase del ensayo, siendo estimado el BAL relativo para cada árbol de cada parcela.

2. Clases sociológicas

Fueron asignadas a cada árbol una de las ocho clases de estatus social definidas de acuerdo con el trabajo de Courdier *et al.* (2002), diferenciando cada clase en función del diámetro normal: la clase 1, para los 100 pies más gruesos por hectárea; la clase 2 para los árboles del 101 al 200 más gruesos por hectárea, la clase 3 para los árboles del 201 al 300 más gruesos por hectárea, y así hasta la clase 8, en la que se incluyen todos los árboles restantes hasta el total de pies por hectárea de cada parcela de ensayo. Esta clasificación de la estructura de la masa considera que las clases 1 y 2 representan a los árboles dominantes y codominantes, respectivamente; las clases 3 a 6 se corresponden con las clases intermedias; y las clases 7 y 8 comprenden los árboles más dominados y sumergidos de la masa. Estas clases de estatus social fueron empleadas para el análisis del efecto de la poda sobre la estructura de la masa recogido en el capítulo 5.

3. Variables estructurales del dosel de copas

Dos de las variables estructurales del dosel de copas más comúnmente utilizadas en los simuladores de incendios forestales, para la determinación del riesgo de inicio

y propagación de un incendio de copas, son la densidad aparente (CBD , procedente del inglés “*Canopy Bulk Density*”) y la altura de la base de la copa (CBH , procedente del inglés “*Canopy Base Height*”). El valor de ambas variables depende de la distribución de la carga de combustibles finos a lo largo del dosel de copas, que en este trabajo fueron definidos como el conjunto de acículas y ramillas menores de 0,6 cm de acuerdo con el trabajo de Scott y Reinhardt (2001).

El cálculo de ambas variables fue efectuado de acuerdo con la metodología recomendada por Sando y Wick (1972). Para ello, en un primer paso fue estimada la biomasa de finos hasta una altura determinada, empleando las ecuaciones definidas durante el análisis de la biomasa arbórea y su distribución a lo largo del fuste. La biomasa fina fue determinada para cada árbol, cada 0,3 metros de altura, desde el suelo hasta el final de la copa, y posteriormente fue estimada la carga total de finos del dosel de copas de todos los árboles, en capas de 0,3 metros de altura, a lo largo de toda la superficie del ensayo, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$CBD = \frac{\sum_{i=1}^n W_{fc\ i}}{S \cdot 0,3} \quad (2.45)$$

donde CBD es la densidad aparente, en kg/m^3 ; $W_{fc\ i}$ es la biomasa de las fracciones finas de la copa (acículas y ramillas hasta 0,6 cm) del árbol i , en kg; S es la superficie de la parcela, en m^2 ; y n es el número de árboles de la parcela.

Tras la estimación del valor del CBD para todo el dosel de copas por capas de 0,3 metros de altura, se procedió a la determinación del perfil de distribución del CBD a lo largo del dosel de copas, a partir del cual se obtuvieron los valores del CBD efectivo ($CBDe$), como el máximo valor del CBD de la curva, y el CBH como la mínima altura a la que se alcanza un valor del CBD de $0,037 \text{ kg/m}^3$ (Sando y Wick, 1972). Existen diferentes recomendaciones del valor del CBD más adecuado para la definición del CBH , siendo seleccionado para este trabajo un valor intermedio entre los $0,011 \text{ kg/m}^3$ recomendados por Beukema *et al.* (1997) y los $0,067 \text{ kg/m}^3$ propuestos por Williams (1978).

2.6. Métodos

En este apartado se presenta la metodología utilizada para el estudio de las variables de poda y su intensidad, la forma y perfil del fuste podado, el crecimiento individual en diámetro y altura y la biomasa arbórea, total y por alturas, que conforman, a rasgos generales, el conjunto de capítulos de la presente tesis. La precisión de las estimaciones disponibles en el sistema experimental de podas y claras permitió generar bases de datos para la evaluación de los tratamientos tanto a nivel de masa como de árbol individual.

El análisis de los datos ha sido realizado mediante la utilización del paquete estadístico SAS 9.1[®] (SAS Institute Inc., 2004 a;b), mientras que la representación gráfica se ha llevado a cabo mediante el programa SigmaPlot 10.0[®] (Systat Software Inc., 2006).

2.6.1. Estudio de las variables de poda

En este estudio fue estimada la intensidad real de poda aplicada en cada árbol, fue realizada una caracterización de las principales variables de copa y fuste, y fueron analizadas la cicatrización de las heridas y la aparición de brotes epicórmicos en los años posteriores a la poda para cada especie.

2.6.1.1. Intensidad real de poda a nivel individual

Tras la realización de la primera poda, de acuerdo con el diseño experimental establecido (explicado en el apartado 2.2.2), fue determinada la intensidad real de poda que había sido aplicada en cada árbol. Para ello, se emplearon las variables de altura total eliminada, número de verticilos vivos y número de verticilos totales. Fueron analizados los valores medios de estas variables, en porcentaje, y comparados con los porcentajes de intensidad de poda diseñada, para definir el criterio de poda real que más se asemejase a la intensidad del tratamiento planteada en el diseño experimental. De esta forma, cuando se trabajase con el parámetro de poda seleccionado se podría garantizar que el número de pies dentro de cada uno de los tratamientos sería más equitativo y real que para el caso de la poda inicial diseñada en la que se contaba con las clases de 0%, 20% y 40% de longitud de copa eliminada, y cuyo porcentaje real aplicado sobre cada árbol dependería directamente del tamaño del mismo.

2.6.1.2. Variables relacionadas con la copa y el fuste podado (ramosidad y diámetro sobre muñón)

Inicialmente, para la caracterización de los tratamientos de poda efectuados en las parcelas permanentes, se realizó un análisis descriptivo, para cada especie, considerando las variables de copa (h_{base} , L_{copa} , D_{copa}) y fuste (ramosidad y diámetro sobre muñón) tomadas en campo tras la realización de la poda (Nv_p , Nr_p , BIX , DSM_i , DSM_f , DSM_m y h_{DSMm}).

Por otra parte, se representaron de forma gráfica las distribuciones de frecuencias de las variables BIX , DSM_f , DSM_m y h_{DSMm} , con el fin de evaluar la adecuación del momento de poda.

Asimismo, fueron analizadas las relaciones existentes entre las principales variables cuantitativas dendrométricas y de poda, mediante la realización de un análisis de correlación simple, estimando el coeficiente de correlación de Pearson, para niveles de significación del 1%, mediante el procedimiento CORR del paquete estadístico SAS/STAT[®] (SAS Institute Inc., 2004b). Los casos de correlación alta bivariada fueron considerados para la definición de modelos lineales de estimación del DSM_m en ambas coníferas, buscando incluir variables dendrométricas sencillas de medir en campo. El ajuste de dichos modelos fue efectuado mediante mínimos cuadrados ordinarios (OLS, término en inglés “*Ordinary Least Squares*”) utilizando el procedimiento MODEL del paquete estadístico SAS/ETS[®] (SAS Institute Inc., 2004a), siendo evaluado el comportamiento de los mismos mediante su análisis gráfico (representación de residuos frente a valores predichos y de valores observados frente a predichos) y estadístico ($REMC$ y R^2_{adj}). Dada la limitada muestra para estos modelos, perteneciente tan solo a una parcela de cada especie, no fue realizada la validación de los modelos, debiendo efectuar dicha validación en un estudio posterior.

2.6.1.3. Formación del centro con defectos

Los diferentes DSM_j caracterizados en los años sucesivos a la poda (inviernos 2008-2009 y 2009-2010) fueron empleados para analizar su relación con otras variables dendrométricas sencillas (d , h , L_{copa} , h_{base} , D_{copa}) mediante la realización de un análisis de correlación empleando el procedimiento CORR del paquete estadístico SAS/STAT[®] (SAS Institute Inc., 2004b). Para ello, fue calculado el coeficiente de correlación de Pearson, para niveles de significación del 1%. La consideración de estas relaciones tan solo fue posible, para las ocho parcelas de ensayo, en el inventario realizado tres años después de la poda (invierno 2008-2009) ya que el DSM_m no había sido evaluado en todas las parcelas durante el inventario del invierno 2009-2010.

El valor del DSM_m , en cambio, sí había sido determinado en el invierno 2009-2010 para una parcela de ensayo de cada especie (monte de La Campa para *Pinus radiata* y monte de Valsera para *Pinus pinaster*), siendo representada la relación existente para dicha variable en los diferentes momentos inventariados.

Por último, se llevó a cabo un ANOVA para los incrementos anuales de los DSM_j evaluados en campo (ic_DSM_i , ic_DSM_f , ic_DSM_m) en ambas especies. La intensidad de poda y el sitio de ensayo fueron incluidos como factores fijos y la subparcela de poda como factor aleatorio. Asimismo se incorporó como covariable el diámetro sobre muñón en el momento inicial (situación inmediatamente posterior a la poda), con el objetivo de homogeneizar la muestra evaluada. Este análisis fue realizado mediante el procedimiento MIXED del paquete estadístico SAS/STAT[®]

(SAS Institute Inc., 2004b), considerando el test de Tukey de comparación de medias con un intervalo de confianza del 95%.

2.6.1.4. Cicatrización

La medición de las heridas de poda seleccionadas para la estimación del *BIX* en la parcela de *Pinus radiata* instalada en el monte de La Campa hizo posible evaluar la cicatrización de las heridas en los años sucesivos al tratamiento. Para ello, fue determinado el porcentaje de heridas que habían mostrado su cierre completo en cada inventario, relacionando ese porcentaje de oclusión con el tamaño de la herida en el momento inmediatamente posterior al tratamiento (clase de diámetro de la herida, *Clase dr_m*), la intensidad real de poda (agrupada en 15%, 30% y 45%), el grosor del árbol podado (clase diamétrica, *C.D.*) y la situación de la herida en el fuste (cuadrante del tronco: norte, sur, este u oeste).

Por otro lado fue analizada la relación existente entre la velocidad de cierre de las heridas (*o_{dr_m}*) y otras variables descriptivas de dichas heridas (*dr_m , h_{drm}*), variables dendro y dasométricas (*d , h , N , G , d_g , H_0 , D_0 ,...*) y algunos índices de competencia independientes de la distancia (*Rd_g , Rd_m , RD_0*) en el momento inmediatamente posterior a la poda. Asimismo, fue evaluada la relación existente entre la velocidad de oclusión, *o_{dr_m}* , y los crecimientos corrientes en diámetro (*ic_d*), altura (*ic_h*) y diámetro sobre muñón (*ic_{DSM_i} , ic_{DSM_f} , ic_{DSM_m} , ic_{DSM_j}*). Para la realización de estos análisis se utilizó nuevamente el procedimiento CORR del paquete estadístico SAS/STAT® (SAS Institute Inc., 2004b), calculando el coeficiente de correlación de Pearson para niveles de significación al 1%.

2.6.1.5. Brotes epicórmicos

Los datos obtenidos en el inventario de brotes epicórmicos permitieron cuantificar la frecuencia de aparición de estas formaciones en el total de los árboles de los ensayos evaluados. Asimismo, fue evaluado el número medio de brotes por árbol en relación con el del grosor del mismo (agrupado en *C.D.*), el tamaño de la copa (clasificado en clases de *L_{copa}*), el sitio de ensayo, la posición en el tronco (altura del fuste y orientación) y la intensidad real de poda (agrupada en 15%, 30% y 45%).

El fuste podado fue dividido en seis secciones iguales, en función de la variable *Nv_p* y la posición del brote respecto al verticilo podado, permitiendo estimar el número medio de brotes por árbol en relación con la sección del fuste en la que se encontraba dicho brote, siendo la 1ª sección la más cercana al suelo y la 6ª la más cercana a la copa.

Dada la presencia de muchos árboles en los que no habían aparecido brotes epicórmicos, el análisis de aparición de estas formaciones en función de la especie, el sitio de ensayo o la intensidad real de poda fue efectuado mediante la realización del test no paramétrico de Kruskal-Wallis, en el que la especie, el sitio de ensayo y la intensidad de poda fueron incluidos de uno en uno como la variable categórica del análisis.

Por otra parte, se llevó a cabo una caracterización de los brotes en función de su estado (vivo, Nbe_v ; muerto, Nbe_m), posición en el fuste (entre verticilos, Nbe_{vert} ; en un verticilo, Nbe_{vert}), extensión (extendido Nbe_{ex} ; no extendido Nbe_{Nex}) y tamaño (largo, Nbe_l ; corto, Nbe_c ; grueso, Nbe_g ; fino, Nbe_f).

Asimismo, los brotes extendidos fueron diferenciados por su tamaño, tomando como valor de referencia 10 cm (longitud apreciable para las formaciones observadas en las parcelas evaluadas), evaluando las variables de d , h y L_{copa} de los árboles que presentaban $Lbe > 10\text{cm}$ y $Lbe < 10\text{cm}$, en función de la intensidad real de poda y el sitio de ensayo.

2.6.2. Estudio del perfil y la forma del centro nudoso

2.6.2.1. Perfil del centro nudoso

Para analizar el efecto que tiene la poda sobre el perfil del centro nudoso de los árboles se realizó el ajuste de diversas funciones de perfil utilizando los datos de diámetro sobre muñón, su altura de ocurrencia, diámetro normal y altura total. La elección de las funciones de perfil a comparar se encuentra condicionada a la especial estructura de la base de datos a emplear (diámetros sobre muñón, medidos en número y distancia diferentes para cada árbol y únicamente hasta una cierta altura), y también a las peculiaridades de las mediciones de diámetros realizadas (diámetros medidos sobre verticilos que no pueden compararse con diámetros medidos en fuste limpio, como es habitualmente el caso del diámetro normal).

La estimación de los parámetros de las funciones fue realizada mediante el procedimiento MODEL del paquete estadístico SAS/ETS® (SAS Institute Inc., 2004a) utilizando mínimos cuadrados generalizados (OLS, término en inglés “*Ordinary Least Squares*”).

Dado el tipo de datos jerárquicos (múltiples observaciones de cada árbol) empleado para la construcción de las funciones de perfil cabe esperar problemas de autocorrelación entre los errores dentro de cada individuo, siendo considerado este problema mediante la inclusión de una estructura autorregresiva continua (CAR(q)) en el término del error, adecuada para datos no equidistantes y no balanceados (Gregoire *et al.*, 1995a; Zimmerman y Núñez-Antón, 2001). La corrección de la

autocorrelación fue evaluada mediante la representación gráfica de los residuos frente a los residuos de las observaciones anteriores de cada árbol, para diferentes órdenes de la estructura autorregresiva, y la estimación del valor del estadístico de Durbin-Watson (DW) (Durbin y Watson, 1951).

Por último fueron determinados los estadísticos de bondad de ajuste: coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}) y raíz del error medio cuadrático ($REMC$); y fue realizado un análisis gráfico de los residuos frente a los valores predichos y de los observados frente a los predichos con el fin de comprobar el comportamiento del modelo. El procedimiento de cálculo de ambos estadísticos se encuentra explicado en el apartado 2.6.5.5 de este capítulo.

A pesar de la importancia de la validación, al no contar con una muestra de datos independientes y puesto que la realización de una validación cruzada no suele aportar mayor información sobre la validez del modelo de la que aporta el ajuste sobre la base de datos completa (Kozak y Kozak, 2003), se optó por utilizar todos los datos disponibles en el ajuste y posponer esa validación para realizar con nuevos datos en el futuro.

2.6.2.2. Estimación del diámetro sobre muñón mediante curvas de perfil del fuste sin defectos

Partiendo de las funciones del fuste definidas para *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* en Asturias sin considerar los defectos del tronco, y de los datos de diámetro sobre verticilo evaluados en campo en las parcelas de ensayo permanentes empleadas en este trabajo, se estimó el engrosamiento correspondiente con cada uno de los verticilos podados, tratando de relacionar el diámetro con y sin muñón (DSM_j y d_j) a una misma altura del árbol. Los detalles de cálculo de este engrosamiento fueron recogidos en el apartado 2.5.1 de este capítulo. Para la definición del tronco sin defectos fueron utilizadas las ecuaciones propuestas por Canga (2008) y Arias (2009) para *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* en Asturias, en base al modelo segmentado de Fang *et al.* (2000).

Con los valores de DSM_j y d_j , y considerando que el engrosamiento del verticilo se encuentra asociado con la intensidad de poda y la especie, se ajustó un modelo lineal para la estimación del DSM_j a partir del d_j incluyendo un valor de engrosamiento constante para cada especie y un factor variable para cada intensidad de poda. El ajuste de esta ecuación fue realizado mediante el procedimiento GLM del software estadístico SAS/STAT® (SAS Institute Inc., 2004b).

2.6.2.3. Forma del centro nudoso

Para la evaluación de la forma del centro nudoso fue evaluado el coeficiente local de forma (k), considerando tan solo los valores de diámetro con defectos. El ajuste de dicho coeficiente, de acuerdo con la función de perfil seleccionada, fue realizado empleando el procedimiento NLIN del paquete estadístico SAS/ETS[®] (SAS Institute Inc., 2004a).

Para analizar la influencia de la poda en la forma del fuste, en ambas especies, fue realizado un análisis de varianza mediante el procedimiento MIXED del paquete estadístico SAS/STAT[®] (SAS Institute Inc., 2004b), para un intervalo de confianza del 95%, y una comparación de medias mediante el test de Tukey.

2.6.3. Estudio del crecimiento

Para el mejor entendimiento de la influencia de la poda en el crecimiento en diámetro y altura de ambas especies fue realizado un análisis de varianza (ANOVA), considerando los factores: especie, intensidad de poda y sitio de ensayo. Para ello, fue utilizado el procedimiento MIXED del paquete estadístico SAS/STAT[®] (SAS Institute Inc., 2004b), con un intervalo de confianza del 95%, y el test de Tukey de comparación de medias para la correcta interpretación de los resultados.

2.6.3.1. Crecimiento individual del diámetro y altura del árbol en función de la poda

Los crecimientos en diámetro normal y altura total de cada árbol fueron determinados como crecimientos corrientes (ic_y , con $y=d$ o h) y como crecimientos acumulados (ia_y , con $y=d$ o h).

Para el crecimiento corriente en diámetro y altura fue realizado un ANOVA considerando como factores la especie y la intensidad real de poda. En todos los casos, los crecimientos fueron utilizados como variable dependiente, y la especie y la intensidad de poda como factores fijos, siendo incluida la subparcela de poda como factor aleatorio. También se incluyeron como covariables los valores de diámetro o altura de cada árbol antes de la poda en los análisis de crecimientos en diámetro y altura, respectivamente. Los análisis fueron realizados mediante el procedimiento MIXED del paquete estadístico SAS/STAT[®] (SAS Institute Inc., 2004b), interpretando los resultados de acuerdo con el test de Tukey de comparación de medias para un intervalo de confianza del 95%.

El crecimiento acumulado en diámetro y altura fue representado gráficamente en función del tiempo, para cada inventario realizado, siendo relacionado también el crecimiento acumulado en diámetro con la longitud de la copa tras la poda.

2.6.3.2. Modelización del crecimiento individual en diámetro y altura

En este estudio fueron empleados los valores de diámetro normal (d) y altura total (h) obtenidos en los inventarios realizados en las ocho parcelas permanentes desde su instalación hasta el invierno 2010-2011.

La estructura de los modelos utilizados se basó en el trabajo de Zeide (1993), que muestra cómo la mayoría de los modelos de crecimiento pueden ser simplificados en una única ecuación general considerando dos componentes: la tendencia hacia un crecimiento ilimitado y las restricciones del mismo. En los modelos fueron incluidas variables influyentes en el crecimiento diamétrico y de altura, con el fin de mejorar la estimación de los modelos, siendo consideradas variables de masa, de árbol individual, que incluyeron variables sensibles a la poda, e índices de competencia independientes de la distancia. La inclusión de variables sensibles al tratamiento permitiría obtener un mejor entendimiento del efecto del tratamiento de poda en el crecimiento de ambos componentes. Los modelos seleccionados para el crecimiento en altura y diámetro fueron ajustados mediante el procedimiento MODEL del paquete estadístico SAS/ETS® (SAS Institute Inc., 2004a), inicialmente por separado mediante el método de mínimos cuadrados ordinarios (OLS, término en inglés “*Ordinary Least Squares*”) y posteriormente de forma simultánea mediante el método de mínimos cuadrados generalizados conjuntos (SUR, término en inglés “*Seemingly Unrelated Regression*”), con el propósito de evitar la posible existencia de correlación entre los errores de los modelos de ambas variables.

Las parcelas fueron medidas tres veces para ambas coníferas por lo que la estructura de datos, con dependencia espacial, implica no poder asumir la independencia de errores, siendo esperable la existencia de problemas de autocorrelación. Para evitar esto, fue modelizado el término del error utilizando una estructura autorregresiva continua (CAR(q)), y fueron representados los residuos frente a los residuos de las observaciones anteriores de cada árbol, así como estimado el valor del estadístico de Durbin-Watson (DW) (Durbin y Watson, 1951) para evaluar la corrección de la autocorrelación y definir el orden de la estructura autorregresiva (q) a utilizar.

El comportamiento de los modelos ajustados fue evaluado mediante el análisis gráfico y estadístico de los mismos. En el primer caso fue representada la distribución de los residuos frente a los valores predichos y de los valores observados frente a los predichos. En el segundo caso se estimaron los estadísticos: raíz cuadrada del error medio cuadrático ($REMC$) y coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}), cuyo procedimiento de cálculo se encuentra explicado en el apartado 2.6.5.5 de este capítulo.

Por las mismas razones que se comentaron anteriormente para el perfil del fuste, y dado que los modelos de crecimiento planteados tenían un enfoque meramente explicativo, no se realizó ningún tipo de validación del modelo, empleando todos los datos disponibles para realizar el ajuste.

2.6.3.3. Influencia de la poda sobre el estatus social y la producción unitaria del árbol

Atendiendo a la clasificación de estatus social comentada en el apartado 2.5.4 de este capítulo, se estimó, para cada inventario, el número y porcentaje de árboles pertenecientes a cada clase sociológica e intensidad real de poda, evaluando el posible cambio de estatus social producido para cada especie y tratamiento.

Además, considerando tan solo los pies en los que no se hubiera producido una modificación de su clase sociológica, fue estimada su producción unitaria, en cada inventario, representando en ambas coníferas el valor medio en volumen para cada clase sociológica y severidad de poda. Las ecuaciones empleadas para el cálculo de dicho volumen se encuentran detalladas en el apartado 2.5.2 de este capítulo.

2.6.4. Estudio de la biomasa arbórea aérea

En este trabajo fueron empleados los datos de peso seco de las diferentes fracciones arbóreas (W_i), estimadas tras el apeo, así como las variables dendrométricas medidas previamente en campo. La modelización de la biomasa arbórea consistió inicialmente en el desarrollo de ecuaciones de estimación del total de estos pesos secos (variable dependiente del modelo) en función de las principales variables de árbol tomadas en campo (variables independientes), y posteriormente, fueron determinadas ecuaciones de estimación de la biomasa de copa acumulada hasta una altura determinada del árbol, mediante la aplicación de un factor de ponderación multiplicativo en las ecuaciones de biomasa total de la copa o de sus componentes.

2.6.4.1. Modelización de la biomasa del árbol completo

En un primer paso se ajustaron los modelos para cada fracción de biomasa arbórea (madera, corteza, ramas de la copa y finos de la copa), considerando el árbol completo. Para ello, fueron ajustados de forma individual modelos alométricos para cada una de estas fracciones, empleando los procedimientos MODEL y REG de los paquetes estadísticos SAS/ETS[®] y SAS/STAT[®], respectivamente (SAS Institute Inc., 2004 a;b). Inicialmente, se linealizaron los modelos alométricos mediante el empleo de logaritmos, y se aplicó el método de selección de variables regresoras STEPWISE del procedimiento REG (SAS Institute Inc., 2004b) para realizar así una

regresión paso a paso que permitiese determinar las variables dendrométricas más influyentes en la estimación. De acuerdo con este primer análisis, fueron seleccionadas aquellas variables explicativas que permitiesen construir modelos equilibrados en términos de precisión, sencillez y aplicación práctica (Wang, 2006). Los modelos alométricos de cada componente arbóreo fueron ajustados individualmente, utilizando como variables independientes las determinadas en el paso anterior. Los ajustes se llevaron a cabo por el método de mínimos cuadrados, mediante el procedimiento MODEL (SAS Institute Inc., 2004a). La evaluación de los distintos modelos ajustados se basó en el análisis de los estadísticos: raíz cuadrada del error medio cuadrático (*REMC*) y el coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}).

En el ajuste de ecuaciones de biomasa resulta frecuente que la varianza de los errores no sea constante, presentando por lo tanto un problema de heterocedasticidad (Parresol, 2001). Por ello, una vez seleccionados y ajustados de forma individual los modelos de cada fracción arbórea, se consideró la presencia de este problema, que fue corregido mediante el método de regresión ponderada. Para comprobar la existencia de heterocedasticidad, se estimaron los residuos *studentizados*, se representaron gráficamente frente a los valores predichos y se realizó el test de White (1980).

2.6.4.2. Modelización de la biomasa del árbol hasta una altura o diámetro límite

La estimación de la biomasa de copa por fracciones hasta una cierta altura en el tronco ha sido realizada habitualmente mediante el empleo de ecuaciones que multiplican la biomasa total de la fracción por un factor de ponderación (menor o igual a 1) que depende, entre otros, de dicha altura o diámetro en punta delgada. Estos modelos se suelen clasificar de acuerdo con la expresión matemática del factor de corrección en dos grupos (p.e. Bullock y Burkhardt, 2003; Adams, 2005): función de razón (en inglés “*Ratio form*”) y función de razón exponencial (en inglés “*Exponential ratio form*”). Estas ecuaciones de razón permiten estimar el peso existente desde el suelo (valor de la función igual a 0) hasta el ápice (valor de la función igual a 1). Las fracciones del fuste (madera y corteza) no fueron consideradas para este análisis.

2.6.4.3. Ajuste simultáneo del sistema de ecuaciones

En la estimación de ecuaciones de biomasa de las distintas fracciones arbóreas es muy importante que se cumpla la propiedad de aditividad, de manera que la suma de estas fracciones debe ser igual a la estimación obtenida por la ecuación de biomasa total. Por ello, el siguiente paso en el procedimiento de modelización de la biomasa

arbórea ha sido el ajuste simultáneo de un sistema de ecuaciones formado por las ecuaciones que presentaron en la fase de selección inicial los mejores resultados en cada fracción arbórea de forma independiente, junto con la ecuación de biomasa total, obtenida como suma de las restantes ecuaciones, y una ecuación de biomasa de finos, constituida por la suma de ramillas (hasta 0,6 cm) y acículas, asegurando la aditividad de todo el sistema. La inclusión de una función de biomasa fina resulta de gran importancia por el papel de estas fracciones finas en el balance nutricional del sistema forestal, y en el inicio y propagación de los incendios de copas.

Los modelos que habían mostrado problemas de heterocedasticidad en el ajuste previo individual fueron ajustados de forma ponderada en el ajuste simultáneo, utilizando los pesos que permitieron, en cada caso, eliminar el problema de heterocedasticidad. Las ecuaciones de las fracciones de biomasa definidas para el total del árbol, fueron ponderadas también con el número de datos empleados, dado el diferente número de datos existente para cada árbol en el ajuste de las ecuaciones para una altura límite. Para las fracciones de biomasa de finos y ramas de la copa hasta una altura límite, al existir múltiples mediciones para el mismo árbol, fue modelizado el término del error empleando una estructura autorregresiva (AR(q)) con el fin de corregir la posible correlación entre observaciones. Se empleó un modelo autorregresivo debido a que la separación entre mediciones era equidistante e igual al tamaño de las trozas empleadas, con la excepción de la última medición en la que ese valor era ligeramente diferente. Para la selección de la estructura autorregresiva más adecuada se determinó el valor del estadístico de Durbin-Watson (Durbin y Watson, 1951), estableciendo como criterio rechazar la existencia de autocorrelación entre los residuos, para un valor de $\alpha = 0,05$.

Para el ajuste simultáneo del sistema de ecuaciones definido fue ajustado simultáneamente empleando el método de máxima verosimilitud con información completa FIML (término en inglés, “*Full Information Maximum Likelihood*”). Esta técnica de ajuste fue seleccionada con el fin de optimizar las predicciones de la biomasa arbórea de las fracciones consideradas, tanto en el árbol completo como hasta una altura límite del mismo. Para ello, fue utilizado el procedimiento MODEL del paquete estadístico SAS/ETS® (SAS Institute Inc., 2004a).

La evaluación de las distintas estimaciones y de los modelos ajustados, en cada caso concreto, se basaron en el análisis de los estadísticos raíz cuadrada del error medio cuadrático (REMC) y coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}). Asimismo, fue realizada una evaluación gráfica de los ajustes mediante la representación gráfica de los valores observados frente a los valores predichos para las distintas ecuaciones.

Una vez evaluada la bondad de ajuste de los modelos, se debe valorar la capacidad predictiva de los mismos mediante su validación con un conjunto

independiente de datos (Vanclay y Skovsgaard, 1997; Pretzsch *et al.*, 2002). Sin embargo, y al igual que ha ocurrido con el resto de modelos estimados en la presente tesis, no fue realizada la validación de los mismos, dado el limitado tamaño de muestra utilizada para la fase de ajuste y la poca información añadida que puede llegar a aportar la validación cruzada (Kozak y Kozak, 2003).

2.6.4.4. Caracterización de la distribución real de la biomasa arbórea aérea y de su contenido de nutrientes

Distribución y acumulación de la biomasa del fuste y de la copa para el árbol completo y hasta una altura determinada

En un primer paso, se llevó a cabo el análisis y representación gráfica de la distribución de cada componente arbóreo del fuste (madera y corteza) y de la copa (ramas y finos), en función del tamaño diamétrico de cada árbol. Para ello fueron empleados los datos procedentes de la muestra de 28 árboles utilizada en una fase previa para el ajuste de las ecuaciones de biomasa. Dentro de la biomasa de copa, se diferenciaron las fracciones de ramas, en ramas finas y gruesas, y la de finos, en ramillas y acículas.

En un paso posterior, se realizó el análisis de la distribución vertical de la biomasa de copa, empleando la función de distribución de Weibull. Los datos empleados se correspondieron con la biomasa por alturas tomada en campo en la muestra de 28 árboles definida para este trabajo. Como fracciones de biomasa de copa se consideraron ramas gruesas, ramas finas, ramillas y acículas, siendo definida para cada una de ellas la función de distribución de Weibull. El ajuste de las funciones fue efectuado mediante el procedimiento MODEL del paquete estadístico SAS/ETS® (SAS Institute Inc., 2004a).

Balance nutricional de las fracciones de biomasa arbórea aérea

Los datos obtenidos en el análisis de nutrientes encargado a un laboratorio externo acreditado permitieron estimar el reparto nutricional de cada componente arbóreo, siendo consideradas las fracciones de madera, corteza, ramas gruesas, ramas finas, ramillas y acículas. Como elementos analizados, se presentan en este trabajo los resultados obtenidos para los macro y micronutrientes: nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), hierro (Fe), manganeso (Mn), zinc (Zn), cobre (Cu) y boro (B).

Biomasa y fijación de carbono a nivel de masa

Se llevó a cabo la estimación de la biomasa forestal (suma de la biomasa de cada árbol del rodal, en t/ha) para las principales fracciones del fuste y de la copa en las

parcelas de ensayo permanentes de *Pinus pinaster* del SERIDA. Los datos empleados para ello se correspondieron con los valores dendrométricos obtenidos en los inventarios realizados durante los inviernos de 2005-2006, antes y después de poda, y los inviernos de 2008-2009 y 2010-2011, después de poda, en los diferentes ensayos.

Para la estimación de la concentración de C de cada fracción arbórea, en el total de árboles de las parcelas evaluadas, fueron empleados los resultados de C obtenidos en los análisis químicos encargados, así como los datos de biomasa forestal determinados para cada sitio de ensayo, obteniendo así la concentración de C total (t/ha) de los rodales.

Los valores de biomasa y carbono a nivel de rodal permitieron determinar el porcentaje de C contenido en la biomasa arbórea total.

Por otra parte, los datos de ambas variables dasométricas (biomasa y carbono) para cada inventario forestal realizado permitieron estimar la cantidad de biomasa producida y C fijado anualmente (ΔW y ΔC , respectivamente, en t/ha año) en el período de tiempo inventariado (inviernos 2005-2006 a 2010-2011).

Por último, fue posible estimar la cantidad de biomasa y carbono extraídos en las operaciones de poda efectuadas en cada parcela de ensayo permanente de *Pinus pinaster*, diferenciando las fracciones de copa eliminadas en dicha operación.

2.6.4.5. Distribución de la densidad de combustibles finos en el dosel de copas

En esta parte del trabajo se ha atendido a la metodología propuesta por Sando y Wick (1972), según los cuales se debe estimar un perfil vertical de distribución de la densidad aparente de los combustibles finos en el dosel de copas, a partir del cual se obtienen los valores de las variables *CBDe* y *CBH*. De acuerdo con estos autores, así como con la aplicación “*Fire and Fuel Extension*” del simulador “*Forest Vegetation Simulator*” (Beukema *et al.*, 1997; Reinhardt y Crookston, 2003), *CBDe* se corresponde con el máximo del perfil de distribución vertical de la densidad aparente de los combustibles finos de la copa. Este perfil fue obtenido mediante la estimación de la densidad de combustibles finos de la copa existente en capas de 0,3 metros definidas desde el suelo hasta la altura máxima del dosel de copas. La densidad de los combustibles finos de la copa presente en cada capa fue estimada como el cociente entre la biomasa de dichos combustibles (estimada mediante las ecuaciones hasta una altura límite previamente determinadas) y el volumen que ocupan dichos combustibles (producto de la superficie de cada parcela por 0,3 m). Las variables dendrométricas necesarias para la determinación de la biomasa de finos fueron obtenidas de los inventarios realizados en las parcelas permanentes de

Pinus pinaster durante los inviernos de 2005-2006, antes y después de poda, y 2008-2009 y 2010-2011 después de poda.

El perfil de densidad aparente obtenido resulta habitualmente irregular, debiendo realizar un suavizado del mismo mediante una media corrida con una ventana de 4,5 metros. En cambio, para este trabajo se ha optado por emplear dicha técnica tan solo en el caso de que dicho perfil resulte muy irregular.

Para el valor de la variable *CBH* se ha considerado la primera altura a la que se alcance una densidad aparente de $0,037 \text{ kg/m}^3$, atendiendo a la definición propuesta por Sando y Wick (1972). Tanto *CBDe* como *CBH* fueron estimadas a nivel de subparcela de poda.

Estimación del perfil de densidad aparente del combustible fino, y las variables *CBDe* y *CBH*: situación real (podas) y simulada (podas y/o claras)

A partir de los datos de las cuatro parcelas permanentes de ensayo de *Pinus pinaster* y de las ecuaciones de biomasa por alturas estimadas previamente fueron determinados, a nivel de subparcela de poda, los perfiles de densidad aparente del combustible fino disponible (*CBD*), las variables *CBDe* y *CBH*, para la situación real, antes y después de poda, así como para esquemas de podas y claras simulados. Las características dasométricas de cada parcela de ensayo y subparcela de poda fueron estimadas a partir de los datos obtenidos en los diferentes inventarios realizados en los ensayos. Para la situación real fueron calculados los valores en el momento anterior a la poda (invierno 2005-2006), denominado control, y después de la intervención (inviernos 2005-2006, 2008-2009 y 2010-2011). Para la situación simulada fueron definidas diferentes intensidades tanto de poda, con extracciones de copa en intervalos de 10% (de 0% a 60%), como de clara (por lo bajo), con extracciones de área basimétrica (*G*) en intervalos de 10% (de 0% a 60%). Las simulaciones fueron realizadas a partir de los datos del inventario realizado durante el invierno 2005-2006.

Asimismo fue efectuado un análisis de varianza para las variables *CBDe* y *CBH*, considerando ambas situaciones (real y simulada). Para ello, fue utilizado el procedimiento MIXED del paquete estadístico SAS/STAT® (SAS Institute Inc., 2004b) para un intervalo de confianza del 95%, y una comparación de medias mediante el test de Tukey. En el primer caso, los factores fijos definidos fueron la poda diseñada (tres niveles) y la parcela (4 sitios de ensayo), siendo considerada la subparcela de poda (64 subparcelas) como factor aleatorio. En el segundo caso se incluyeron como factores fijos los tratamientos simulados (49 tratamientos) y la parcela de ensayo (4 rodales) y como factor aleatorio la subparcela de poda (64 subparcelas).

Posteriormente fueron representados gráficamente los perfiles de densidad aparente de los diferentes tratamientos de podas y/o claras simulados en una subparcela de poda con una densidad aparente intermedia. Por otra parte, se realizó la representación gráfica del *CBD_e* en función de la densidad y el área basimétrica remanentes (*Nremanente* y *Gremanente*, respectivamente), para los escenarios de clara simulados, a partir de los datos del inventario realizado en el invierno 2005-2006 en las parcelas permanentes de *Pinus pinaster*.

Estimación de la intensidad lineal crítica y la velocidad crítica: situación real (podas) y simulada (podas y/o claras)

De acuerdo con Van Wagner (1977), en un rodal de coníferas se pueden diferenciar dos fases en el comportamiento de un fuego: (1) la iniciación, o transmisión del fuego de superficie a las copas; y (2) la propagación posterior de ese fuego de copas, diferenciando entre fuegos de copa activos, pasivos e independientes. Estos criterios, junto con modelos de probabilidad de iniciación de fuegos de copa como los propuestos por Xanthopoulos (1990), Alexander (1998), Cruz (1999) o Cruz *et al.* (2003a; 2004; 2006), y ecuaciones para estimar el comportamiento de esos fuegos como las definidas por Rothermel (1991), el “*Forestry Canada Fire Danger Group*” (1992), Cruz (1999) o Cruz *et al.* (2005), constituyen la base de la mayoría de los simuladores de predicción del comportamiento de un incendio forestal (“*Forestry Canada Fire Danger Group*”, 1992; Finney, 1998; Scott, 1999; Reinhardt y Crookston, 2003; Alexander *et al.*, 2006; Andrews, 2008).

El criterio de Van Wagner (1977) para la fase de iniciación de un fuego de copas se basa en comparar la intensidad lineal del fuego de superficie con una intensidad lineal crítica (I'_L), de manera que si se supera ese límite crítico es previsible que el fuego se transmita a las copas. Los valores de la intensidad lineal del fuego de superficie se pueden estimar empleando el modelo de Rothermel (1972) y van a depender fundamentalmente del tipo de combustible que está manteniendo ese fuego, de su humedad (tanto combustibles vivos como muertos), de la pendiente del terreno y de la velocidad del viento. La expresión para la estimación de dicha intensidad lineal crítica (I'_L), es:

$$I'_L = \left[\frac{CBH \cdot (460 + 25,9 \cdot FMC)}{100} \right]^{3/2} \quad (2.46)$$

donde I'_L es la intensidad lineal crítica, en kw/m; *CBH* es la altura de la base de la copa (“*Canopy Base Height*”), en m; y *FMC* es la humedad foliar (“*Foliar Moisture Content*”), en %.

Una vez que el fuego de superficie se ha transmitido a las copas, el criterio de Van Wagner (1977) para la fase de propagación se basa en comparar la velocidad de

propagación estimada para el fuego de copas activo, con una velocidad de propagación crítica (R'_{activo}), de modo que si se supera ese umbral crítico es muy probable que el fuego de copas se propague junto con el fuego de superficie en lo que se denomina fuego de copas activo. En caso contrario el fuego de copas no pasaría de ser un fuego de copas pasivo, en el que se queman árboles aislados o en grupos reducidos, pero sin un frente continuo. La velocidad de propagación para el fuego de copas activo se estima habitualmente con el modelo de Rothermel (1991), basado en Rothermel (1972) que únicamente es válido para fuegos de superficie. El valor de la velocidad de propagación crítica (R'_{activo}) comentada fue estimado de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$R'_{activo} = \frac{3}{CBDe} \quad (2.47)$$

donde R'_{activo} es la velocidad de propagación crítica, en m/min; y $CBDe$ es el valor máximo de la distribución vertical de la densidad aparente del combustible fino disponible en el dosel de copas ("Canopy Bulk Density", CBD), en kg/m^3 .

Empleando las ecuaciones de I'_L y R'_{activo} se analizó el efecto que tienen los tratamientos selvícolas sobre estos valores, considerando tan solo la influencia de las variables estructurales $CBDe$ y CBH , para una situación de condiciones atmosféricas, topográficas y de humedad de los combustibles constante. La determinación de I'_L y R'_{activo} se llevó a cabo para la situación real, antes y después de poda, y la situación simulada, considerando diferentes esquemas de podas y/o claras.

Ajuste y modelización de la función de densidad de Weibull

Para modelizar la función de densidad de probabilidad (*pdf*) de Weibull fue realizado el ajuste de ecuaciones relacionando los parámetros de dicha función con variables de rodal sencillas de determinar a partir de variables tomadas en campo. Inicialmente fue construido el perfil de densidad aparente de cada parcela de ensayo permanente de *Pinus pinaster*, utilizando para ello las ecuaciones de biomasa de finos hasta una altura límite determinadas previamente y los datos dendrométricos obtenidos en cada inventario de campo efectuado en dichas parcelas. Tras la obtención de las distribuciones verticales de densidad aparente de cada parcela e inventario, antes y después de la poda, fue realizado el ajuste de la función de Weibull. La determinación de los parámetros b y c de la función de Weibull fue realizada mediante un ajuste por mínimos cuadrados empleando el procedimiento NLIN del paquete estadístico SAS/ETS® (SAS Institute Inc., 2004a). El valor del parámetro a se fijó en 0,3 metros (altura del primer estrato).

Con los parámetros obtenidos para esta función, fue realizado un análisis de varianza considerando un nivel de significación $\alpha = 95\%$, mediante el procedimiento

MIXED del paquete estadístico SAS/STAT® (SAS Institute Inc., 2004b), evaluando la posible existencia de diferencias significativas en los valores de ambos parámetros (b y c) en función de la intensidad de poda diseñada e inventario.

Posteriormente fue ajustado un modelo lineal relacionando cada parámetro (b y c) con variables dasométricas sencillas de estimar a partir de datos medidos en campo, evaluando el ajuste de los modelos mediante los estadísticos R^2_{adj} y $REMC$ (cuyas expresiones de cálculo han sido recogidas en el apartado 2.6.5.5 de este capítulo). Como no se conoce qué tipo de relación puede existir entre los parámetros de la función de densidad y las variables de rodal, se planteó previamente el ajuste de modelos lineales, realizando una selección inicial del mejor conjunto de variables regresoras para cada modelo. Para ello, fue utilizado el método de selección de variables “*stepwise*” mediante el procedimiento REG del paquete estadístico SAS/STAT® (SAS Institute Inc., 2004b).

Por último, fue analizada la bondad del ajuste de las funciones modelizadas comparándolas con las observadas mediante el empleo del test Kolmogorov-Smirnov.

2.6.5. Análisis estadístico

En el conjunto del presente trabajo se trató de realizar una estadística descriptiva sencilla, mediante el resumen numérico y gráfico de las principales variables estudiadas, así como una estadística inferencial, basada en la estimación de características numéricas, la descripción de la asociación entre algunas variables (análisis de correlación), la modelización (análisis de regresión) y, en algunos casos, el análisis de varianza (ANOVA) y la comparación de medias mediante métodos no paramétricos. En este apartado se recoge una breve descripción de los principales procedimientos estadísticos empleados en los diferentes capítulos de la tesis. Se presentan también las técnicas utilizadas para la evaluación de los modelos desarrollados. Todos los análisis y cálculos estadísticos fueron realizados mediante los paquetes estadísticos SAS/ETS® y SAS/STAT® (SAS Institute Inc., 2004 a;b).

2.6.5.1. Técnicas de ajuste de los modelos

Análisis de regresión

El ajuste de ecuaciones de regresión es el método más empleado en el campo de la modelización forestal. Este tipo de ajuste considera la relación existente entre una variable dependiente y_i y una o más variables independientes (variables regresoras o explicativas) x_i a través de un modelo matemático que puede adoptar diferentes expresiones (de tipo lineal o no lineal).

Los valores que adopta la variable dependiente dependen de los valores de las variables independientes analizadas y de otras variables que no han sido evaluadas. De esta manera, se pueden distinguir dos componentes en su variabilidad: uno sistemático y otro aleatorio. La parte sistemática puede ser modelizada mediante una ecuación de regresión, mientras que la parte aleatoria (error aleatorio, e_i) es debida a que dicha ecuación de regresión no puede describir con exactitud la respuesta de la variable dependiente a las diferentes combinaciones de los valores de las variables independientes (Álvarez-González, 1997).

En los modelos de regresión, la variable explicativa no es de tipo categórico o discreto, sino de tipo continuo. El objetivo de los modelos de regresión es analizar cómo cambios en la variable explicativa continua afectan a la variable de interés. El modelo de regresión más sencillo es aquél en el que se considera que el valor de la variable dependiente es igual al producto del valor de la variable explicativa por una constante, más el término de error aleatorio. A la constante en el modelo se le denomina parámetro, componente o coeficiente, y permite explicar el efecto que sobre la variable dependiente tiene el incrementar en una unidad el valor de la variable explicativa o independiente (Calama, 2004).

Existen diferentes metodologías que permiten estimar los valores de los parámetros que intervienen en la ecuación de regresión. De todas ellas, el método utilizado en este trabajo ha sido el de mínimos cuadrados, que se basa en la minimización de la suma de cuadrados de las diferencias entre los valores reales de la variable dependiente y los valores predichos por la ecuación de regresión.

Son diversas las variables independientes que pueden ser consideradas en un modelo de regresión. Por esta razón, es importante realizar un análisis previo que permita conocer la relación existente entre las potenciales variables explicativas y la variable dependiente. De todas las variables candidatas para incluir en el ajuste deben seleccionarse tan solo aquellas variables regresoras que resulten significativas (de acuerdo con el contraste individual t). Entre ellas, el modelo deberá incluir un número de variables explicativas que permita obtener una buena bondad del ajuste (mejor a mayor número de variables explicativas), con una adecuada varianza de las estimaciones de la variable dependiente y ausencia de colinealidad acusada (a mayor número de variables explicativas mayor probabilidad de colinealidad entre las variables independientes y por tanto mayor varianza).

Para la selección de las variables explicativas a incluir en un modelo de regresión han sido empleadas diversas metodologías (Draper y Smith, 1981) basadas en la hipótesis de una relación lineal entre las variables dependiente e independientes. Todas ellas realizan una selección de las variables explicativas más influyentes en la estimación de la variable respuesta. Para ello, llevan a cabo un análisis paso a paso bajo diferentes criterios (maximizar el coeficiente de determinación, minimizar el

valor del estadístico F utilizando el contraste del modelo, etc.) en función del procedimiento empleado. De todos ellos, los más empleados son: la eliminación progresiva de variables (*backward regression*), la introducción progresiva de variables (*forward regression*) y la regresión paso a paso (*stepwise regression*).

En algunos de los capítulos de este trabajo se ha utilizado el método *stepwise* o regresión paso a paso, que ha sido ampliamente empleado en la selección de variables regresoras dentro de la modelización forestal. Este algoritmo permite el control de la entrada y salida de variables. En su secuencia, va introduciendo progresivamente en el modelo las diferentes variables independientes, sin mantener ninguna de ellas fija, lo que permite considerar si todas las variables deben entrar o no (evita problemas de multicolinealidad). En otros capítulos se han examinado todas las variables consideradas para la definición del modelo, ajustando diferentes ecuaciones y comparando los resultados para la determinación del modelo de regresión final.

En función de la relación de las variables dependiente e independientes podemos hablar de diferentes tipos de regresión: lineal o no lineal. Ambos procedimientos han sido empleados en el presente estudio. Por ello, se comentan a continuación, algunos aspectos generales relacionados con estos modelos.

Regresión lineal

Un modelo de regresión lineal puede incluir una o varias variables independientes, diferenciando así entre ecuaciones de regresión lineal simple o múltiple, respectivamente. La expresión general del modelo, es:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_{i1} + \dots + \beta_p \cdot x_{ip} + e_i \quad (2.48)$$

donde y_i es la variable dependiente, x_{ip} son las variables independientes, β_j son los parámetros a estimar ($j = 0, 1, \dots, p$), y e_i el error aleatorio o perturbación ($i = 1, 2, \dots, n$) de la observación i -ésima, siendo n el número de observaciones utilizadas en el ajuste del modelo.

Todo modelo lineal se fundamenta en las siguientes hipótesis (Vanclay, 1994; Ryan, 1997):

1. La función de regresión es lineal:

$E(y_i/x_i) = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_{i1} + \dots + \beta_p \cdot x_{ip}$, lo que equivale a una esperanza matemática de los errores nula: $E(e_i) = 0$, con $i = 1, 2, \dots, n$.

2. La varianza es constante (homocedasticidad):

(x_{ip}) , $var(y_i/x_i) = var(y_i/x_{i1}, \dots, x_{ip}) = \sigma^2$ con $i = 1, 2, \dots, n$ o lo que es lo mismo $var(e_i) = \sigma^2$, con $i = 1, 2, \dots, n$.

Por lo tanto, la dispersión de los errores obtenida en la estimación de la variable dependiente (y_i) es igual para cualquier valor de la/s variable/s independiente/s.

3. Las observaciones de la variable dependiente (y_i) son independientes:

Esto implica la independencia también de los errores. Adoptando la hipótesis de normalidad, la $cov(y_i, y_j) = 0$ si $i \neq j$, que en términos de errores equivale a que $cov(e_i, e_j) = 0$ si $i \neq j$.

4. La distribución de la variable dependiente es normal:

$$y_i/x_i = y_i/x_{i1}, \dots, x_{ip} \in N(\beta_0 + \beta_1 \cdot x_{i1} + \dots + \beta_p \cdot x_{ip}, \sigma^2)$$

De acuerdo con esta hipótesis los errores también se distribuyen normalmente.

5. La independencia lineal de las variables regresoras:

El cumplimiento de esta hipótesis asegura la ausencia de multicolinealidad. En caso contrario, sería difícil separar la contribución que cada variable tiene en el modelo y consecuentemente los parámetros serían inestables y las varianzas elevadas. La multicolinealidad puede ser solucionada eliminando del modelo aquellas variables regresoras que sean combinación lineal de las restantes.

El cumplimiento de estas suposiciones estadísticas resulta importante para la correcta estimación de los parámetros de la ecuación. De acuerdo con Sánchez-Rodríguez (2001), pueden ser quebrantadas, por orden de importancia, las hipótesis de independencia, homocedasticidad y normalidad.

El procedimiento de cálculo llevado a cabo en los modelos de regresión lineal se basa en minimizar la suma de cuadrados del error, (diferencias entre valores observados y predichos por el modelo ajustado). Las estimaciones obtenidas con esta metodología son conocidas como estimaciones mínimas cuadráticas, y la cantidad minimizada como suma de los cuadrados de los errores. En este trabajo, el ajuste de los modelos lineales se ha realizado por mínimos cuadrados ordinarios (OLS), para los casos de varianza de los errores homogénea, con el procedimiento REG del paquete estadístico SAS/STAT® (SAS Institute Inc., 2004b) y por mínimos cuadrados ponderados, cuando la varianza no era homogénea, con el procedimiento MODEL del paquete estadístico SAS/ETS® (SAS Institute Inc., 2004a).

Tras el ajuste de las ecuaciones fue verificado para cada parámetro estimado por mínimos cuadrados mediante el test de la t de Student, que el valor estimado fuera significativamente distinto de cero para un nivel de significación α determinado. En este trabajo se ha considerado un valor nivel de significación de 0,05 ($\alpha = 5\%$).

Regresión no lineal

En un modelo de regresión no lineal la variable dependiente es expresada en función de las variables independientes mediante una función no lineal. Al tratarse de una función no aditiva, como ocurría en el caso de las regresiones lineales, los procesos de estimación de los parámetros y la base estadística comentados anteriormente se modifican.

Las hipótesis de partida del ajuste no lineal son las siguientes (Draper y Smith, 1981):

1. La media del error aleatorio es nulo ($e_i = 0$) y su varianza es constante (habitualmente con distribución normal).
2. Los errores son independientes y no están correlacionados.

El método de estimación de los parámetros depende de la estructura de los errores e_i :

1. Estimación de máxima verosimilitud, cuando la ley de variación de los errores es conocida.
2. Mínimos cuadrados ordinarios, si la varianza que siguen los errores es constante (homocedasticidad).
3. Mínimos cuadrados ponderados por la varianza, si la varianza que siguen los errores es heterogénea (heterocedasticidad), pero conocida o estimada.
4. Mínimos cuadrados modificados, cuando la varianza que siguen los errores es heterogénea y depende del valor de los parámetros.

En este trabajo fueron empleados los métodos de mínimos cuadrados ordinarios y mínimos cuadrados ponderados por la varianza (regresión no lineal ponderada). Cabe destacar, en este último caso, la posibilidad de modificar las ponderaciones de forma iterativa, al contrario de lo que sucede en la regresión lineal.

Para llevar a cabo un proceso de iteración es necesario emplear unos valores iniciales de los parámetros del modelo, que son usados para calcular la suma de los cuadrados de los residuos y a partir de los cuales se pueden conocer las modificaciones necesarias de los valores para reducir el valor obtenido de esta suma de cuadrados. El proceso se repite iterativamente hasta que no puede obtenerse una reducción suficientemente grande (establecida a priori) de la suma de cuadrados residual.

El método de regresión no lineal se encuentra limitado, en relación con la regresión lineal, por el hecho de no presentar necesariamente una única solución no

sesgada y de mínima varianza para un conjunto de datos. Las soluciones obtenidas en las iteraciones pueden verse influenciadas por el método de estimación y las condiciones de inicio planteadas. Existe la posibilidad de alcanzar un mínimo local durante la iteración que de lugar a una solución parcial del modelo ajustado, que no tiene por qué ser la solución óptima del ajuste (dada por la convergencia hacia el mínimo absoluto). Por ello, si la región de convergencia óptima no es conocida, se recomienda probar varios valores iniciales de los parámetros. Otro de los inconvenientes de la regresión no lineal es la imposibilidad de establecer intervalos de confianza exactos para las estimaciones, sino únicamente aproximados bajo la suposición de linealidad en el punto de estimación.

Los parámetros se consideran significativos si su intervalo de confianza no incluye el valor cero (los dos valores extremos son del mismo signo). Los intervalos de confianza planteados en este trabajo se han establecido al 95% de probabilidad.

El ajuste de los modelos no lineales se ha realizado empleando los procedimientos NLIN y MODEL del paquete estadístico SAS (SAS Institute Inc., 2004 a;b), usando el método de iteración de Gauss-Newton (Hartley, 1961). Los valores de partida de los parámetros utilizados en el proceso iterativo fueron obtenidos, en los casos en los que fue posible, linealizando previamente la ecuación y realizando un ajuste por mínimos cuadrados ordinarios empleando el procedimiento REG del paquete estadístico SAS/STAT® (SAS Institute Inc., 2004b). Esta forma de proceder se considera útil para resolver muchos problemas de ajuste en los modelos no lineales (Draper y Smith, 1981). En las funciones en las que no fue posible linealizar, se emplearon los inicializadores obtenidos por otros autores en trabajos de similares características.

2.6.5.2. Detección y corrección de la heterocedasticidad

La descripción del comportamiento de unidades muestrales, como rodales o árboles, mediante ecuaciones de regresión, presenta, en ocasiones, ciertos problemas estadísticos. El empleo de datos procedentes de diferentes unidades muestrales, con distintas características, puede resultar en un problema de heterocedasticidad (varianza de los errores no constante). En estos casos, es frecuente que la varianza del error esté relacionada con una o más variables explicativas del modelo. A pesar de que los estimadores mínimos cuadráticos siguen siendo centrados en casos de heterocedasticidad, éstos no resultan eficientes y las fórmulas de las varianzas de los estimadores de los parámetros no son correctas, por lo que no pueden ser aplicados los contrastes de significación habituales (Kozak, 1997). Por lo tanto, dada la influencia de la heterocedasticidad en los modelos de regresión, resulta necesario detectar y corregir la falta de homogeneidad de la varianza de los modelos que resulten heterocedásticos.

Existen diferentes métodos gráficos y numéricos que ayudan a detectar la heterocedasticidad. De todos ellos, dos de los procedimientos numéricos más utilizados son los test de Breusch y Pagan (1979) y White (1980). Ambos contrastes, tienen como hipótesis nula que los residuos son homocedásticos y sus estadísticos siguen una distribución χ^2 , por lo que si se obtiene un p-valor bajo ($< 0,05$), se rechazaría la hipótesis nula, quedando patente la heterocedasticidad del modelo. En este trabajo, fue utilizado el test de White (1980), siendo descartado el empleo del contraste de Breusch y Pagan (1979) por la gran variabilidad de los resultados obtenidos en función de las variables independientes consideradas en el test. También fue realizado un análisis visual para comprobar la corrección de la heterocedasticidad de los modelos que inicialmente mostraron indicios de ser heterocedásticos. Para ello, fueron representados gráficamente los residuos “*studentizados*” frente a los valores estimados. Los residuos “*studentizados*” fueron calculados como los residuos ordinarios entre el error estándar del residuo, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$r_{ti} = \frac{r_i}{REMC \cdot \sqrt{(1 - h_{ii})}} \quad (2.49)$$

donde r_{ti} es el residuo “*studentizado*” de la observación *i*-ésima, r_i es el residuo ordinario de la observación *i*-ésima, obtenido como diferencia del valor observado y el valor estimado, $REMC$ es la raíz cuadrada del error medio cuadrático (detallado posteriormente en el apartado 2.6.5.5) y el término h_{ii} se conoce como *leverage* de la observación *i*. Su valor será mayor cuanto más diferente sea esta observación, en términos de las variables explicativas, del resto de observaciones, pudiendo variar entre $1/n$ y 1. Su valor se corresponde con el elemento *i*-ésimo de la diagonal principal de la matriz de proyección H , cuya expresión es:

$$H = x_i \cdot (X' \cdot X)^{-1} \cdot x_i' \quad (2.50)$$

donde la matriz X se corresponde con la matriz de derivadas parciales del modelo ajustado con respecto a cada uno de sus parámetros; x_i es la *i*-ésima fila de la matriz X ; y X' y x_i' son las matrices traspuestas de X y x_i , respectivamente.

Una vez detectados los modelos heterocedásticos, se debe acudir a uno de los métodos que permiten corregir la heterocedasticidad. De las diversas técnicas que permiten realizar dicha corrección, dos de los métodos más empleados en el ámbito forestal son: la transformación de las variables dependientes y/o de las variables regresoras y el análisis ponderado. En este estudio, se llevó a cabo el método de regresión ponderada, por ser una de las técnicas más ampliamente utilizadas para corregir la falta de homogeneidad de varianza de las ecuaciones de estimación de biomasa arbórea (Schlaegel, 1982; Clutter *et al.*, 1983; Cunia, 1986; Parresol, 1999), especialmente desde que la capacidad de proceso de datos de los ordenadores permite este tipo de análisis (Balboa-Murias *et al.*, 2006; Canga, 2008; Fernández-Rivas, 2008; Pérez-Cruzado y Rodríguez-Soalleiro, 2011, entre otros). La

metodología a seguir con esta técnica se basa en asociar a cada observación un peso igual a la inversa de su varianza (σ_i^2). Es habitual que esta varianza esté relacionada con una o más variables independientes, por lo que sería necesario llegar a conocer esta relación, lo que puede resultar bastante complicado (Balboa, 2005). Resulta difícil estimar el valor del peso más adecuado cuando la varianza no es conocida. Sin embargo, es frecuente que la varianza muestre un incremento a mayor valor de la variable independiente (x_i) en una representación gráfica de los residuos frente a las variables independientes. Este tipo de heterocedasticidad se puede corregir mediante la utilización de una función potencial como peso, de acuerdo con la siguiente expresión: $\sigma_i^2 = x_i^\tau$ (Neter *et al.*, 1996). El valor x_i utilizado en esta ponderación se corresponde con alguna combinación de las variables independientes que intervienen en el modelo. El valor τ del exponente puede ser determinado mediante dos técnicas diferentes, obteniendo la mayor reducción en el valor del índice de Furnival (1961) o empleando la metodología de optimización propuesta por Harvey (1976). En este trabajo, el valor óptimo del coeficiente τ fue determinado mediante la segunda técnica, en donde los errores del modelo ajustado sin pesos (\hat{e}_i) son utilizados como variable dependiente del modelo potencial de varianza del error, que puede ser expresado mediante las siguientes ecuaciones:

$$\hat{e}_i^2 = x_i^\tau \text{ o bien } \ln \hat{e}_i^2 = \tau \cdot \ln(x_i) \quad (2.51)$$

De las dos alternativas posibles mostradas en la Ecuación (2.51) se optó por la segunda de ellas, que fue utilizada en el capítulo 6 para el ajuste de cada fracción arbórea mediante mínimos cuadrados ordinarios, empleando el procedimiento REG del paquete estadístico SAS/STAT[®] (SAS Institute Inc., 2004b). En cada caso, fueron probados diferentes factores de ponderación en función de las variables independientes que interviniesen en cada modelo, siendo utilizado el test de White (1980), para cada uno de ellos, de cara a seleccionar el factor de ponderación más adecuado.

2.6.5.3. Detección y corrección de la autocorrelación

La tipología de datos empleada en la construcción de un modelo forestal resulta clave en la selección del método estadístico a utilizar. Los datos procedentes de mediciones tomadas una única vez por unidad de observación, como pueden ser los datos procedentes de parcelas temporales, son conocidos como datos de tipo transversal, y los errores obtenidos al caracterizar el modelo son independientes. Sin embargo, cuando los datos proceden de mediciones tomadas en más de una ocasión por unidad de observación, como pueden ser los datos procedentes de un mismo árbol o parcela (parcelas de intervalo o permanentes) son de tipo longitudinal, entre ellos existe dependencia temporal, y por lo tanto es posible que los errores asociados

a sus estimaciones en los modelos no sean independientes, lo que conlleva al incumplimiento de las hipótesis de partida del análisis de regresión.

La modelización de una función de perfil es un claro ejemplo de este problema. Las medidas de diámetros a diferentes alturas tomadas en cada árbol para la construcción de estas ecuaciones van a estar relacionadas espacialmente. Se trata de observaciones que no pueden ser consideradas como independientes, y los errores asociados a sus estimaciones es probable que estén relacionados entre si en lo que se denomina autocorrelación.

Aunque las estimaciones de los parámetros de regresión permanecen insesgadas ante la presencia de autocorrelación, no son eficientes (Myers, 1990). Es importante considerar que los parámetros estimados, en presencia de autocorrelación, no poseen la propiedad de mínima varianza (Neter *et al.*, 1996), el error medio cuadrático del modelo puede subestimar la varianza del término de error, los errores estándar de los coeficientes de regresión pueden estar seriamente subestimados (Neter *et al.*, 1996; Rawlings *et al.*, 1998) y consecuentemente las pruebas que utilizan distribuciones t o F , y por extensión los intervalos de confianza pueden no proporcionar valores reales (Neter *et al.*, 1996). Por tanto, es necesario utilizar procedimientos estadísticos apropiados que eviten los problemas de autocorrelación cuando se realice el ajuste.

Han sido propuestas dos metodologías para el análisis de datos longitudinales. La primera de ellas implica el uso de modelos no lineales con efectos mixtos, que consiste en incluir efectos aleatorios al modelo (Gregoire *et al.*, 1995a) donde se ajusta el modelo teniendo en cuenta cada árbol o parcela, existiendo unos parámetros generales de la población y otros locales por unidad muestral, reduciendo de este modo el impacto de la autocorrelación (Biging, 1985; Gregoire *et al.*, 1995a; Tasissa y Burkhart, 1998; Garber y Maguire, 2003). La segunda metodología consiste en asumir una estructura particular del error (Monserud, 1986; Tasissa y Burkhart, 1998; Garber y Maguire, 2003; Rodríguez y Molina, 2003) que tenga en cuenta la particular relación entre errores de la misma unidad muestral detectada tras los ajustes iniciales de los modelos.

En el presente trabajo se trató de corregir la autocorrelación entre los residuos mediante la utilización de procedimientos autorregresivos. Este tipo de procesos están diseñados de manera que el comportamiento de una variable en un instante de tiempo depende de valores pasados de la propia variable. Así, tal y como explica Rodríguez (2005), si el valor de la variable en el momento t depende de su valor en el periodo anterior más un término aleatorio se dice que el proceso es autorregresivo de primer orden (AR(1)). La estructura autorregresiva AR(q) modeliza el término de error en la medición $i(e_i)$ considerando que está correlacionado con los errores de las mediciones $i-1$, $i-2$, hasta $i-p$ y que el coeficiente de correlación varía Φ_i :

$$e_i = \Phi_1 \cdot e_{i-1} + \Phi_2 \cdot e_{i-2} + \dots + \Phi_p \cdot e_{i-p} + \varepsilon_i \quad (2.52)$$

donde ε_i es el error de la medición i con esperanza nula, varianza constante y covarianza nula.

Por otra parte, en algunos casos, ha sido modelizando el término del error utilizando una estructura autorregresiva continua (CAR(q)), adecuada para datos no equidistantes y no balanceados (Gregoire *et al.*, 1995a; Zimmerman y Núñez-Antón, 2001):

$$e_{ij} = \sum_{p=1}^{p=x} I_p \cdot \rho_p^{h_{ij}-h_{ij-p}} \cdot e_{ij-p} + \varepsilon_{ij} \quad (2.53)$$

donde e_{ij} es el residuo j -ésimo del individuo i -ésimo; e_{ij-p} es el residuo $j-p$ -ésimo del individuo i -ésimo; $I_p=1$ para $j > p$ y 0 para $j \leq p$; ρ_p es el parámetro autorregresivo de orden p a estimar; y $h_{ij} - h_{ij-p}$ es la distancia que separa las observaciones j -ésima y $j-p$ -ésima dentro de cada individuo i , siendo $h_{ij} > h_{ij-p}$. En estos casos ε_{ij} es el término del error bajo condiciones de independencia.

De acuerdo con Rodríguez (2005), se plantea la necesidad de conocer qué esquema sigue la perturbación y cuál es la mejor estructura para su modelización. Para detectar la presencia de autocorrelación pueden ser empleados métodos gráficos y contrastes de hipótesis. En el primer caso, se puede detectar si existe autocorrelación cuando existen comportamientos sistemáticos para los residuos. En el segundo caso, mediante contrastes de hipótesis, se puede considerar, mediante una regla de decisión, si se debe o no rechazar la hipótesis nula con los datos de la muestra y con un nivel de significación concreto.

En la presente tesis, la evaluación de la presencia de autocorrelación y el orden de la estructura AR(q) o CAR(q) a utilizar, se llevó a cabo mediante la representación y análisis visual de los gráficos de residuos frente a residuos con diferentes retrasos para el modelo ajustado así como mediante la estimación del estadístico de Durbin-Watson (Durbin y Watson, 1951), estableciendo como criterio rechazar la existencia de autocorrelación entre los residuos para un $\alpha = 0,05$.

Los ajustes, considerando la estructura del error AR(q) o CAR(q) fueron realizados mediante el procedimiento MODEL del paquete estadístico SAS/ETS® (SAS Institute Inc., 2004a).

2.6.5.4. Ajuste de sistemas de ecuaciones relacionadas

El ajuste de ecuaciones que están relacionadas entre sí implica la definición de un sistema de ecuaciones que son ajustadas simultáneamente. Para este tipo de análisis, existen diversas metodologías de ajuste, dependiendo de las características de las ecuaciones y de las relaciones entre ellas (Castedo-Dorado, 2004).

Todo sistema de ecuaciones relacionadas contiene una serie de variables en la parte izquierda de la ecuación, denominadas variables endógenas o dependientes

(determinadas por el sistema de ecuaciones), y variables en la parte derecha de la ecuación, denominadas predeterminadas, y que pueden ser variables endógenas (valores estimados por el sistema) o exógenas (valores medidos directamente).

Una de las clasificaciones de los sistemas de ecuaciones relacionadas más empleadas es la definida por Pindyck y Rubinfeld (1981), quienes describen tres tipos de sistemas: (1) Sistemas formados por ecuaciones aparentemente no relacionadas (las variables endógenas no aparecen nunca como independientes en otras ecuaciones del sistema); (2) Sistemas de ecuaciones simultáneas (algunas variables endógenas aparecen también como regresoras en otras ecuaciones del sistema); y (3) Sistemas de ecuaciones recursivas (las variables endógenas aparecen también como regresoras en las otras ecuaciones del sistema de forma secuencial).

Los sistemas de ecuaciones que se han ajustado en esta tesis se corresponden con las dos primeras categorías descritas (Ecuaciones (2.54) y (2.55), respectivamente), cuya estructura genérica es la siguiente:

$$\begin{aligned} \text{Ecuaciones aparentemente no relacionadas:} \quad & y_1 = \beta_{10} + \beta_{11} \cdot x_1 + \beta_{12} \cdot x_2 + e_1 \\ & y_2 = \beta_{20} + \beta_{21} \cdot x_3 + \beta_{22} \cdot x_4 + e_2 \\ & y_3 = \beta_{30} + \beta_{31} \cdot x_5 + \beta_{32} \cdot x_6 + e_3 \end{aligned} \quad (2.54)$$

$$\begin{aligned} \text{Ecuaciones simultáneas:} \quad & y_1 = \beta_{10} + \beta_{12} \cdot y_2 + \beta_{13} \cdot y_3 + \beta_{14} \cdot x_1 + \beta_{15} \cdot x_2 + e_1 \\ & y_2 = \beta_{20} + \beta_{21} \cdot y_1 + \beta_{23} \cdot y_3 + \beta_{24} \cdot x_1 + \beta_{25} \cdot x_2 + e_2 \\ & y_3 = \beta_{30} + \beta_{31} \cdot y_1 + \beta_{32} \cdot y_2 + \beta_{34} \cdot x_1 + \beta_{35} \cdot x_2 + e_3 \end{aligned} \quad (2.55)$$

donde y_i ($i = 1, 2, 3$) son las variables dependientes, x_j ($j = 1, 2, \dots, 6$) son las variables independientes, β_{ip} son los parámetros a estimar, y e_i son los errores que se distribuyen según una normal $N(0, \sigma^2)$.

Para ajustar los sistemas de ecuaciones aparentemente no relacionadas (Ecuaciones (2.54)), tal y como indica Castedo-Dorado (2004), lo más lógico resulta emplear mínimos cuadrados generalizados (regresión SUR, del inglés “*Seemingly Unrelated Regression*”). Los errores, en cambio, sí pueden estar correlacionados, circunstancia que puede afectar a las estimaciones de los errores estándar de los parámetros y a los intervalos de confianza generados a partir de ellos.

Se trata de una técnica de estimación que ha mostrado una gran eficiencia en la determinación de los parámetros cuando los términos del error del sistema de ecuaciones están correlacionados (p.e. Zellner, 1962; Rose y Lynch, 2001).

La aplicación de este método requiere la estimación de la matriz de covarianza del error entre ecuaciones. El procedimiento más habitual es ajustar inicialmente cada ecuación mediante mínimos cuadrados ordinarios (OLS, del inglés “*Ordinary Least Squares*”), para determinar los residuos que son utilizados posteriormente para estimar la matriz de covarianza. Por último, en base a esta matriz estimada, se

realiza la estimación SUR. En este trabajo, se ha empleado la metodología SUR para el ajuste de las ecuaciones de estimación del crecimiento individual en diámetro y altura. Para ello se ha empleado el procedimiento MODEL del paquete estadístico SAS/ETS® (SAS Institute Inc., 2004a).

En teoría, el uso del método SUR para la estimación de parámetros es, por lo menos, tan eficiente como la técnica de OLS para muestras grandes. Sin embargo, cuando las muestras son pequeñas, el hecho de tener que estimar la matriz de covarianzas del error a partir de OLS supone un incremento de la variabilidad de las estimaciones SUR, que puede provocar una menor eficiencia en relación con el método OLS. Por ello, se recomienda utilizar OLS cuando el tamaño de la muestra es pequeño y las correlaciones entre ecuaciones son bajas (Castedo-Dorado, 2004).

Para ajustar los sistemas de ecuaciones simultáneas no recursivos (Ecuaciones (2.55)), una de las metodologías posibles, empleada en la presente tesis doctoral es la conocida como FIML (término del inglés “*Full Information Maximum Likelihood*”). Se trata de una técnica que considera todas las ecuaciones y parámetros en forma conjunta para la estimación. Esta metodología FIML ha sido utilizada para el ajuste del sistema de ecuaciones de estimación de la biomasa. Para ello se ha empleado el procedimiento MODEL del paquete estadístico SAS/ETS® (SAS Institute Inc., 2004a).

En este tipo de sistema de ecuaciones, y considerando el estudio de la biomasa de los diferentes componentes arbóreos, se debe cumplir que las variables explicativas del modelo de biomasa total sean todas las variables regresoras que aparecen en los modelos de cada componente, siendo su expresión matemática igual a la suma de las expresiones matemáticas de cada fracción por separado (Parresol, 2001).

$$\begin{aligned}\hat{W}_1 &= f_1(x_1) \\ \hat{W}_2 &= f_2(x_2) \\ &\vdots \\ \hat{W}_k &= f_k(x_k)\end{aligned}\tag{2.56}$$

En la estimación de ecuaciones de biomasa de las distintas fracciones arbóreas es muy importante que los resultados sean coherentes, de manera que si una fracción contiene a otra, la primera deberá ser siempre superior o igual a la segunda (Cunia y Briggs, 1984; Bengoa, 1999). Otra de las propiedades que deben cumplir las ecuaciones de biomasa de los diferentes componentes arbóreos es la denominada aditividad, de acuerdo con la cual la suma de las fracciones ($\hat{W}_1, \hat{W}_2, \dots, \hat{W}_k$) debe ser igual a la estimación obtenida por la ecuación de biomasa total (\hat{W}_{total}) (Kozak, 1970; Chiyenda y Kozak, 1984; Cunia, 1986; Parresol, 1999). Para cumplir esta

propiedad existen tres procedimientos aplicables a sistemas de ecuaciones lineales, siendo válidos tan solo dos de ellos en sistemas de ecuaciones no lineales. La diferencia esencial entre estos procedimientos se encuentra en la manera en que son agregados los diferentes componentes. Una descripción más detallada de los mismos se puede encontrar en el trabajo realizado por Balboa (2005).

El uso de metodologías de ajuste simultáneo garantiza que el sistema de ecuaciones resultante del ajuste sea siempre el mejor posible, aunque el ajuste de las ecuaciones de cada fracción de forma individual no sea necesariamente el mejor. Además, estos procedimientos presentan la ventaja de ser muy flexibles en su aplicación, permitiendo que las ecuaciones del sistema puedan presentar diferente estructura matemática o incluso variables independientes distintas. Otro de los aspectos positivos de estos métodos es la posibilidad de ser utilizados en sistemas de ecuaciones con diferentes ponderaciones por tamaño muestral.

Con esta metodología se consigue una reducción de los intervalos de confianza y predicción de las estimaciones de biomasa, debido a la menor varianza que se obtiene al considerar la correlación existente entre los errores de todas las fracciones. Esto conlleva una mayor eficacia en la estimación de los parámetros (Parresol, 2001; Paulo *et al.*, 2002; Carvalho y Parresol, 2003).

2.6.5.5. Evaluación de los modelos

La evaluación de un modelo implica dos fases diferentes, por un lado esta el análisis de la bondad de su ajuste y por otro lado esta la fase de validación de su comportamiento con un conjunto de datos independiente del empleado en la estimación de sus parámetros. En esta tesis, la primera fase se ha llevado a cabo mediante métodos numéricos y gráficos.

La evaluación de la capacidad de ajuste de los modelos estimados en los diferentes capítulos de la tesis se basó en la determinación de algunos de los estadísticos de bondad de ajuste más utilizados en la modelización forestal: el coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}) y la raíz del error medio cuadrático (*REMC*). El primero de ellos ha sido ampliamente utilizado en la selección de modelos, y permite evaluar la variabilidad explicada por los mismos, penalizando aquellos modelos con un mayor número de parámetros a estimar. Sin embargo, su aplicación a modelos no lineales no es adecuada, por lo que, de acuerdo con Myers (1990), en estos casos se ha de ajustar una recta de regresión entre las estimaciones del modelo no lineal y los valores observados, y se ha de considerar como valor del coeficiente de regresión ajustado el obtenido en este ajuste lineal. El estadístico *REMC*, indica la precisión de las estimaciones, permitiendo estimar su error estándar. Presenta, por tanto, la ventaja de estar expresado en las mismas unidades que la variable dependiente. Las expresiones de estos estadísticos son las siguientes:

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{(n-1) \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{(n-p) \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (2.57)$$

$$REMC = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-p}} \quad (2.58)$$

donde R^2_{adj} es el coeficiente de determinación ajustado; $REMC$ es la raíz cuadrada del error medio cuadrático; y_i , \hat{y}_i e \bar{y}_i son los valores observados, predichos y medios de la variable dependiente, respectivamente; n es el número total de observaciones usadas para el ajuste del modelo y p es el número de parámetros a estimar en el modelo.

De acuerdo con los estadísticos expuestos, el modelo será mejor cuando presente un menor valor de $REMC$ y un mayor valor del R^2_{adj} .

Otro paso importante en la evaluación del grado de fiabilidad de los modelos es el análisis gráfico, procedimiento ampliamente aceptado para la evaluación de los ajustes, al permitir evaluar las hipótesis de partida asumidas en un modelo de regresión (normalidad de residuos, homogeneidad de varianza e independencia de residuos), detectar fácilmente errores o comportamientos anómalos (p.e. Draper y Smith, 1981; Soares *et al.*, 1995; Gadow *et al.*, 2001; Diéguez-Aranda *et al.*, 2006), e incluso determinar posibles variables predictivas que deben introducirse adicionalmente en el modelo (Álvarez-González y Ruiz-González, 1995). Esta técnica de inspección visual resulta también de utilidad para detectar posibles tendencias sistemáticas de los datos (Crecente-Campo, 2008). Con este fin, se representaron gráficamente los residuos frente a los valores observados y estos últimos frente a los valores predichos para las distintas ecuaciones ajustadas en la presente tesis, ya que los errores se encuentran correlacionados con los valores reales, pero no con las predicciones (Castedo-Dorado, 2004).

Es importante destacar que la representación gráfica de residuos ($y_i - \hat{y}_i$) frente a los valores predichos de la variable dependiente (\hat{y}_i) permite además detectar la presencia de desviaciones locales que los estadísticos numéricos no son capaces de detectar. Asimismo, permite valorar el cumplimiento de algunas de las asunciones estadísticas del análisis de regresión: (1) los residuos insesgados ($E(e_i) = 0$) deben estar distribuidos en torno al cero; (2) los residuos deben tener varianza homogénea, propiedad fácilmente detectable de forma visual puesto que cuando no se cumple aparece una distribución en forma de embudo o trompeta de los residuos (heterocedasticidad).

Las evaluaciones anteriores permiten indicar la bondad del ajuste, pero no necesariamente esto es indicativo de la calidad de una predicción futura (Myers, 1990). Para ello, una vez ajustados los modelos, se debe realizar la validación de los mismos usando un conjunto de datos independiente. Snee (1977, cit. por Kozak y

Kozak, 2003) describe cuatro procedimientos básicos para la validación de los modelos de regresión, siendo los dos más empleados en la modelización forestal: (1) el uso de nuevos datos independientes a los del ajuste; y (2) la división de los datos en dos grupos, utilizando uno de ellos para el ajuste y el otro para la validación (validación cruzada).

Sin embargo, la limitación de no contar con dos muestras de datos independientes y el hecho de que la opción de la validación cruzada no aporta, en general, más información de su comportamiento que la que se puede extraer del propio ajuste cuando se emplean todos los datos en las estimaciones de los parámetros (Kozak y Kozak, 2003), ha llevado a no realizar este proceso de validación y esperar a contar en el futuro con nuevas muestras independientes que permitan tener una idea del comportamiento del modelo aplicado a datos ajenos e independientes a los empleados en este trabajo para el ajuste de los modelos.

2.6.5.6. Otros análisis y diagnósticos estadísticos

Análisis de correlación simple

La correlación simple entre variables cuantitativas (dos a dos) indica la fuerza y dirección de la respuesta de una variable frente a cambios en el valor de la otra. Con este tipo de análisis se trata de estudiar la relación lineal entre dos variables aleatorias o entre los valores específicos de un conjunto de datos. Es importante entender que la existencia de correlación entre dos variables no implica la existencia de una relación de causalidad. Del mismo modo, la no existencia de correlación no implica que las dos variables no puedan tener algún otro tipo de relación que no sea lineal.

Existen diversos coeficientes que permiten medir el grado de correlación entre dos variables. Dos de los más utilizados son el coeficiente de Pearson y el coeficiente no paramétrico de Spearman. Ambos coeficientes requieren que las observaciones sean independientes. El empleo del coeficiente paramétrico de Pearson, requiere el cumplimiento de la normalidad de las variables estudiadas; por el contrario, el coeficiente no paramétrico de Spearman puede ser utilizado para variables que no se distribuyen con normalidad.

En este trabajo se ha empleado el coeficiente de correlación de Pearson (r), estimado como el cociente entre la covarianza de las dos variables estudiadas y el producto de sus desviaciones estándar. Este coeficiente mide el grado de asociación (asociación lineal) entre dos variables cuantitativas, tomando valores entre -1 y +1, lo que indica que al aumentar el valor de una variable también aumenta el valor de la otra cuando el valor de r es positivo, y por el contrario, al aumentar el valor de una variable disminuye el valor de la otra cuando el valor de r es negativo. La

correlación es perfecta si $r = \pm 1$ (los puntos formarían una recta), mientras que no existe relación lineal cuando $r = 0$. Para el empleo de este coeficiente es necesario definir a priori el valor de r que será relevante en el estudio. En este trabajo se han determinado dos niveles de significación, para valores de r de 0,01.

Para llevar a cabo este análisis se ha utilizado el estadístico de correlación lineal de Pearson calculado mediante el procedimiento CORR del paquete estadístico SAS/STAT® (SAS Institute Inc., 2004b).

Empleo de la función de densidad de Weibull

La función de densidad de Weibull ha sido utilizada en el campo forestal desde que Bailey y Dell (1973) la propusieron para modelizar distribuciones diamétricas. Los buenos resultados mostrados por esta función para la estimación de las distribuciones de diámetros, llevó poco después, a otros autores como Gary (1978), al empleo de dicha función para la estimación de la distribución de las fracciones de la copa del árbol, con un buen comportamiento. La formulación de esta ecuación, es:

$$f(x) = \left(\frac{\beta_2}{\beta_1} \right) \cdot \left(\frac{x - \beta_3}{\beta_1} \right)^{\beta_2 - 1} \cdot e^{-\left(\frac{x - \beta_3}{\beta_1} \right)^{\beta_2}} \quad (2.59)$$

donde x es la variable aleatoria; β_3 es un parámetro de situación, que define el origen de la función; β_1 es un parámetro de escala; y, β_2 es un parámetro de forma.

En este trabajo, dicha ecuación ha sido empleada para la estimación de la distribución de la densidad aparente de árboles jóvenes de *Pinus pinaster* (capítulo 6), en donde el parámetro β_3 se hizo coincidir con la altura del primer estrato (0,3 metros). Los otros dos parámetros, β_1 y β_2 , fueron estimados por mínimos cuadrados mediante el procedimiento NLIN del paquete estadístico SAS/ETS® (SAS Institute Inc., 2004a), con el método de iteración de Gauss-Newton (Hartley, 1961).

La función de distribución, a través de la expresión integrada de la función de densidad anterior (Ecuación 2.59), adquiere una forma mucho más sencilla:

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x - \beta_3}{\beta_1} \right)^{\beta_2}} \quad (2.60)$$

donde x es la variable aleatoria; β_3 es un parámetro de situación, que define el origen de la función; β_1 es un parámetro de escala; y β_2 es un parámetro de forma.

Esta ecuación ha sido utilizada en el ajuste de la biomasa acumulada a lo largo del árbol (biomasa hasta una altura determinada) como factor de ponderación (menor o igual a 1) que multiplica la biomasa total de la fracción arbórea considerada. En este caso, al parámetro β_3 se le ha asignado un valor de 0, utilizando por tanto la función de distribución de Weibull biparamétrica.

El ajuste de los modelos fue realizado mediante el procedimiento MODEL del paquete estadístico SAS/ETS® (SAS Institute Inc., 2004a).

Para evaluar la bondad del ajuste de una función de distribución existen diversos test, destacando el test de Kolmogorov-Smirnov y la prueba χ^2 de Pearson. En este trabajo se ha empleado el primero de ellos para la modelización de la distribución de los combustibles finos en el dosel de copas de *Pinus pinaster* en función de variables de rodal (capítulo 6).

Los pasos a seguir para la realización de este test son los siguientes:

1. Ordenar de forma ascendente los diámetros (d_i) observados ($d_1 \leq d_2 \leq \dots \leq d_n$), donde n es el número de árboles de la parcela ($i = 1, \dots, n$).
2. Calcular el estadístico D_n , cuyo valor viene dado por la siguiente expresión:

$$D_n = \max_{1 \leq i \leq n} \left(F(d_i) - \frac{i-1}{n}, \frac{i}{n} - F(d_i) \right) \quad (2.61)$$

Siendo $F(d_i)$ el valor relativo de la función de distribución ajustada para el diámetro d_i .

3. Comparar el valor calculado con el valor crítico $D_{n,\alpha}^*$, obtenido en una tabla en función del número de datos n y del nivel de significación escogido α . Si D_n es mayor que el valor crítico, se rechaza la hipótesis nula de que la población de la cual proviene la muestra siga la función de distribución ajustada.

Para la determinación de los valores críticos cuando el nivel de significación α es superior al 20% se puede emplear la aproximación propuesta por Miller (1956):

$$D_{n,\alpha}^* = \sqrt{\frac{-\ln\left(\frac{1}{2}\alpha\right)}{2n}} \quad (2.62)$$

donde \ln es el logaritmo natural; α es el nivel de significación, en tanto por uno; y n el número de datos.

Este test presenta el inconveniente de que si los parámetros de la función de distribución se estiman a partir de la muestra de datos, las estimaciones de los valores críticos no son correctas, tendiendo a aceptar la hipótesis nula. En estos casos, los valores críticos deben estimarse aplicando métodos de remuestreo (p.e. Babu y Rao, 2004).

Análisis de Varianza

El análisis de varianza (ANOVA, del inglés “*Analysis of Variance*”) es una técnica estadística que permite dividir la variación total existente en un conjunto de

datos en diversas fuentes de variación, y se valora, mediante un contraste de hipótesis, si la aportación relativa de cada una de estas fuentes de variación a la variación total es significativa o no. Habitualmente, este tipo de análisis es utilizado para estudiar la influencia que sobre una variable dependiente determinada tienen los diferentes niveles que puede experimentar una variable explicativa de tipo categórica (denominada factor). La influencia de cada nivel del factor sobre la variable de interés recibe el nombre de efecto.

El ANOVA parte de algunos supuestos que han de cumplirse: independencia de las observaciones; distribución normal de los errores y homogeneidad de las varianzas (homocedasticidad).

Inicialmente, en este tipo de análisis, se plantea una hipótesis nula de igualdad de las medias. Se debe establecer un valor de significación, habitualmente 95% para aceptar o rechazar la hipótesis nula (si $\alpha \leq 0,05$ se rechaza la hipótesis nula). Cuando ésta es rechazada, resulta interesante identificar entre qué grupos se han producido las diferencias. Los contrastes utilizados con este fin son denominados de comparaciones múltiples o comparaciones *a posteriori*, y proporcionan información detallada sobre las diferencias entre las medias dos a dos. Existen diversas técnicas, que pueden clasificarse de forma genérica en contrastes no planeados o *post hoc* y contrastes planeados o *ad hoc*. Se puede decir que todas estas metodologías varían en función de las características de los grupos a comparar. En este estudio, las comparaciones *post hoc* se realizaron con el test de Tukey por tratarse de una prueba bastante conservadora (recomendable cuando el tamaño de los grupos no presenta grandes diferencias).

Cuando no se cumplen los datos de normalidad u homogeneidad de la varianza se suele acudir a otros métodos no paramétricos. De todos ellos, el test de Kruskal y Wallis (1952) es uno de los más utilizados. Esta prueba es una generalización de la prueba U de Mann-Whitney para el caso de c grupos independientes, y no exige el supuesto de normalidad ni el de homogeneidad de varianza. Se trata de una prueba empleada para probar la hipótesis nula de que p muestras independientes provienen de poblaciones idénticas. Consiste en un procedimiento no paramétrico para probar la igualdad de medias. Cuando se rechaza esta hipótesis nula se puede afirmar que la media resulta diferente.

Para efectuar la prueba no paramétrica H de Kruskal-Wallis, se deben seguir los pasos que se resumen a continuación:

1. Ordenar el conjunto de las n observaciones.
2. Obtener la suma R_j de los rangos de cada grupo.
3. Estadístico de contraste:

$$H = \frac{\sum_{j=1}^c n_j \cdot (\bar{R}_j - \bar{R})^2}{\frac{n \cdot (n+1)}{12}} \quad (2.63)$$

donde n_j es el número de datos de la muestra ; R_j es la suma de los rangos de la muestra; y n es el número total de datos.

4. Contraste de hipótesis:

Si $H < \chi^2_{c-1;\alpha}$ - Diferencia no significativa

Si $H \geq \chi^2_{c-1;\alpha}$ - Diferencia significativa



CAPÍTULO 3

**Caracterización y evaluación de la poda
en masas jóvenes regulares de *Pinus
radiata* D. Don y *Pinus pinaster* Aiton**

CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LA PODA EN MASAS JÓVENES REGULARES DE *Pinus radiata* D. Don Y *Pinus pinaster* Aiton

3.1. Introducción

La **poda** ha mostrado ser una intervención clave en la mejora de la calidad de la madera y, por tanto, en el incremento del valor del producto final. Esto se debe a que la eliminación de las ramas mediante dicha operación selvícola permite limitar los defectos asociados a las mismas (principalmente nudos y desviación de la fibra) en una zona central del fuste, a partir de la cual se forma madera de calidad, libre de defectos (madera limpia o “*clearwood*”).

La optimización de la poda para acceder a mercados industriales de mayor valor añadido, y justificar así el gasto de la intervención, requiere conocer la técnica, el momento y la intensidad del tratamiento más adecuados para cada especie y ámbito geográfico, debiendo realizar, además, el control estricto de la operación para obtener los mejores resultados. Asimismo, para maximizar la cantidad de madera libre de defectos que se forma tras la poda y cierre de las heridas, resulta necesario favorecer el crecimiento diametral de los árboles. Para ello, la realización de claras tras la poda ha mostrado ser una intervención fundamental para potenciar un mayor crecimiento diamétrico de los árboles (p.e. Smith *et al.*, 1997; Cuadros-Tavira, 1997; Forrester *et al.*, 2010; 2012). Las claras, a su vez, permiten eliminar aquellos individuos que presenten un mal estado sanitario, favoreciendo así la calidad sanitaria de la masa y mejorando por tanto la calidad de la madera. Por otra parte, la apertura de espacio asociada a la realización de claras supone una mayor expansión de la copa y engrosamiento de las ramas, lo que conlleva a una mayor nudosidad en la madera (p.e. Maguire *et al.*, 1991; Makinen, 1999). Para evitar esto, y para tratar de optimizar la realización conjunta de las podas y las claras, se debe buscar el equilibrio entre favorecer el crecimiento en grosor de los árboles podados, mediante las claras, y podar las ramas antes de que éstas adquieran engrosamientos que supongan una mayor nudosidad y puedan comprometer la calidad final de la madera.

Además de los factores comentados, asociados a las propias operaciones selvícolas, existen a su vez otros aspectos internos y externos que han mostrado su influencia en el resultado final de la operación y en la calidad del producto obtenido. Dentro de los factores internos, destacan las características genéticas de la planta, especialmente las relacionadas con la ramosidad (frecuencia, ángulo, grosor) y el

crecimiento del árbol (asociado a su vez con la densidad de la madera). En relación con los factores externos, presentan gran importancia las características fenotípicas de los árboles y la calidad del sitio. A pesar de que la correcta evaluación de la poda es relativamente compleja, dado el conjunto de factores internos y externos implicados en el resultado de la misma, la caracterización de la calidad de esta intervención selvícola ha sido simplificada mediante el análisis del tamaño del centro del tronco que contiene los defectos, conocido también como **centro defectuoso**. Para ello, habitualmente se utiliza una terminología específica, desarrollada inicialmente por Park (1980), en donde se diferencia el diámetro medido en la zona que contiene las ramas eliminadas en el momento inmediatamente posterior a la poda (diámetro sobre muñón, *DSM*) y tras el cierre de las heridas (diámetro sobre oclusión, *DSO*). Park (1980; 1982; 1985) define que ese centro defectuoso debe incluir las ramas ocluidas y la sinuosidad propia del fuste, siendo a partir del diámetro sobre oclusión cuando se forme madera limpia. De todos los posibles diámetros sobre muñón que pueden ser medidos a lo largo del fuste podado, el más importante de todos es aquel que alcanza el mayor grosor (diámetro máximo sobre muñón, *DSM_m*), por ser éste el más determinante en el tamaño final del centro que contiene los defectos. Por este motivo, el diámetro máximo sobre muñón es utilizado en diversos países (p.e. Nueva Zelanda, Australia y Argentina) como variable de referencia del momento más oportuno para la poda, planificando la realización de intervenciones sucesivas en función del tamaño de dicho diámetro, tratando de asegurar que su valor entre cada tratamiento sea lo más uniforme posible. De esta manera, la consideración del diámetro máximo sobre muñón para realizar más de una operación de poda permite asegurar un cambio mínimo en el posterior tamaño del diámetro sobre oclusión entre intervenciones, minimizando así la posible pérdida de madera limpia en el producto final. La mayoría de los estudios enfocados a caracterizar la poda para producir madera libre de nudos, considerando el valor del diámetro máximo sobre muñón, se han centrado sobre todo en especies de coníferas de crecimiento rápido. Así, por ejemplo, han sido ampliamente evaluadas las especies de *Pinus radiata* D. Don o *Pinus taeda* L. en países como Nueva Zelanda, Australia, Chile o Argentina (p.e. Fenton, *et al.*, 1972; Olivares y Meneses, 1985; Valdivieso, 1990; Maclaren, 1993; England, 1998; Kurtz y Ferruchi, 2000; 2004; Meneses y Guzman, 2000; Reid, 2002; Private Forests Tasmania, 2004; Costas *et al.*, 2006; 2007; Aparicio y Caniza, 2009). En el sur de Europa, sin embargo, tan solo han sido evaluadas algunas plantaciones de *Pinus radiata* en el País Vasco (Chauchard y Olalde, 2005; 2006), no habiéndose encontrado estudios de este tipo para masas de *Pinus pinaster* Aiton.

La determinación de estas variables puede ser realizada directamente en campo, mediante métodos no destructivos, realizando el seguimiento de los diámetros *DSM* y *DSO*, obtenidos tras la poda y cierre de las heridas, o mediante métodos

destructivos, tratando de reconstruir el comportamiento interno del árbol tras el tratamiento selvícola. Este último método permite determinar con mayor exactitud el tamaño de las variables *DSM* y *DSO* pero también exige la corta del árbol para su evaluación.

Para simplificar la estimación de las variables *DSM* y *DSO*, y definir la calidad de la poda, diversos estudios (p.e. Sutton y Crowe, 1975; Park, 1980; 1982; Olivares y Meneses, 1985; Fassola *et al.*, 1999 a;c;e;f;g; 2008a) han desarrollado modelos lineales sencillos que relacionan el tamaño del centro defectuoso (*DSO*) con alguno de los diámetros sobre muñón obtenidos en el momento de la poda, especialmente el diámetro sobre muñón de mayor grosor (*DSM_m*). Asimismo, autores como Knowles *et al.* (1987), Fassola y Gelid de Ruibal (1997), Fassola *et al.* (1999 a;c;e;f;g; 2002a; 2004), Olivares y Meneses (1992) o Andenmatten *et al.* (2002), han encontrado buenas relaciones entre el *DSM_m* y diversas variables dendrométricas (p.e. diámetro normal, altura total, altura de la base de la copa total y viva, diámetro de rama, diámetro de la rama más gruesa a la altura del *DSM_m* o algunas variables relacionadas con el perfil del fuste). Este tipo de ecuaciones, han sido determinadas sobre todo en especies de coníferas. Ejemplo de ellos son las funciones desarrolladas en masas podadas de *Pinus radiata* en Nueva Zelanda (Sutton y Crowe, 1975; Olivares y Meneses, 1985; Knowles *et al.*, 1987), o *Pinus elliottii* Engelm. (Fassola, 1993) y *Pinus taeda* L. (Fassola y Gelid de Ruibal, 1997; Fassola *et al.*, 1999 a;c;e;f;g; 2002a; Andenmatten *et al.*, 2002) en Argentina.

El tamaño del centro con defectos, junto con la dimensión final de la troza, y la rectitud de la misma, son factores determinantes en el valor final del producto y en el grado de eficiencia durante la conversión (Park, 1980; 1982; Turner y Price, 1996), siendo todos ellos factores claves en el rendimiento posterior de la madera libre de nudos durante el procesamiento industrial. Por ello, se debe intentar realizar la poda de árboles que no presenten diámetros excesivos ni fustes inclinados o torcidos. Asimismo, se deben considerar aspectos que permitan minimizar el tamaño del centro con defectos como son el tamaño de las ramas y el tipo de corte de las mismas, debiendo evitar la poda de ramas de mayor grosor o realizar cortes de mala calidad que supongan un mayor tiempo de oclusión de las heridas y un mayor tamaño del centro con defectos (Petruncio *et al.*, 1997).

De acuerdo con lo anterior, resulta de gran interés realizar una evaluación más específica de la poda, considerando la **cicatrización** de las heridas, y aquellos aspectos relacionados con el tiempo y crecimiento radial necesarios para cubrir dichas heridas. Mayores detalles sobre el proceso de oclusión pueden encontrarse en trabajos como los de Mattheck (1991), Shigo (1991) o Russell (1995).

Algunos de los factores que han sido recogidos en la bibliografía (Cahill *et al.*, 1986; O'Hara, 1991; Maguire y Petruncio, 1995; O'Hara *et al.*, 1995; Russell, 1995;

Petruncio *et al.*, 1997) como determinantes en el proceso de cicatrización, son: el tipo de corte (cortes lisos ocluyen más rápido y resinan menos que cortes dentados); la zona de corte (herir el cuello de la rama supone una cicatrización más rápida); el muñón tras el corte (mayor muñón tarda más en cicatrizar); el estado de las ramas (ramas muertas ocluyen más lentamente que ramas vivas); el tamaño de las ramas (ramas de mayor tamaño requieren más tiempo de cierre); el crecimiento del árbol (mayor crecimiento del árbol ayuda a la oclusión); y la época de poda (en invierno se promueve una oclusión con menor infección).

La consideración de todos estos aspectos permite facilitar la posterior cicatrización de las heridas y no ralentizar la definición del centro con defectos y la formación de madera libre de nudos, evitando así ampliar el tamaño del centro defectuoso a expensas de la formación de madera limpia, lo que supondría un menor retorno de la inversión realizada con la operación de poda (Petruncio *et al.*, 1997). Para conseguir esto, resulta también importante la herramienta utilizada, debiendo tratar de emplear la más adecuada para la obtención de un corte liso y limpio.

Los estudios sobre la oclusión de las heridas tras la poda en especies de coníferas han centrado sus trabajos principalmente en *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco (Cahill *et al.*, 1986; O'Hara, 1991; Maguire y Petruncio, 1995; Petruncio *et al.*, 1997), y algunas de las principales coníferas de las zonas rocosas (O'Hara *et al.*, 1995). No existen en cambio trabajos publicados de cicatrización para *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* en Europa.

Por otra parte, existe la posibilidad de obtener respuestas a la poda que pueden depreciar la calidad de la madera, como es el caso de los **brotos epicórmicos** en el tronco. Este tipo de formaciones resultan especialmente importantes cuando permanecen adheridas en el fuste durante mucho tiempo, adquiriendo desarrollos similares a los de cualquier otra rama, conformando, de esta manera, defectos en la madera que pueden llegar a depreciar su valor si no son eliminados a tiempo.

Las formaciones epicórmicas son originadas a partir de yemas adventicias. Se puede hablar de brotes epicórmicos, también conocidos como brotes chupones o simplemente chupones. Algunos autores como Barrio *et al.* (2009) consideran estas formaciones como un “caso especial” de ramas que se pueden presentar en determinadas especies y bajo ciertas condiciones. Otros como Fontaine *et al.* (2004) diferencian entre brotes y ramas, destacando que los primeros van a causar siempre menores defectos en la madera.

Son diversos los factores que han sido descritos como desencadenantes del desarrollo de estas formaciones epicórmicas, y es probable que la producción de las mismas sea provocada por la acción conjunta de esos factores. De todos ellos, los más comúnmente mencionados en la bibliografía, son: cambios en la temperatura, luz y/o balance hormonal en los tejidos del tronco (Collier y Turnblom, 2001),

modificaciones en el balance de nutrientes o de humedad (Deal *et al.*, 2003), variaciones repentinas en las condiciones ambientales (Del Tredici, 2001) y/o daños en el árbol de tipo mecánico, debido a plagas y enfermedades o por mortalidad natural (Collier y Turnblom, 2001; Barrio *et al.*, 2009). Algunos de estos factores pueden verse modificados por la propia gestión selvícola, sobre todo cuando se realiza una selvicultura intensiva (p.e. podas y claras) en la que los árboles son sometidos repentinamente a una mayor exposición lumínica. Además, de acuerdo con la revisión bibliográfica de Espinosa y Muñoz (2005), existen a su vez aspectos asociados con el árbol que van a estar implicados en la susceptibilidad del mismo para desarrollar este tipo de formaciones, como son: la clase de copa del árbol (mayor predisposición en árboles suprimidos); la especie (menor susceptibilidad en coníferas, con excepción de especies como *Pinus radiata*); la edad del árbol (mayor aparición de brotes a menor edad); la posición del árbol en la masa (mayor desarrollo de brotes en los pies situados más cerca de los bordes del rodal); y la exposición del tronco (mayor tendencia en los lados con exposición más cálida). Asimismo, trabajos como el de O'Hara y Berrill (2009), indican la importancia de considerar a su vez aspectos genéticos para cuantificar la heredabilidad de la aparición y desarrollo de estas formaciones.

Para evitar la depreciación de la madera que puede suponer la permanencia de brotes o ramas epicórmicas en el tronco, estas formaciones deben ser eliminadas del fuste, lo que conlleva un incremento de los costes de poda. Por ello, la evaluación de estas formaciones resulta clave para la gestión selvícola enfocada a la producción de madera de calidad, al permitir la selección de los tratamientos y esquemas selvícolas, así como de la especie, más adecuados para obtener madera limpia.

Algunas de las coníferas para las que ha sido evaluada la presencia de brotes o ramas epicórmicas en respuesta a la selvicultura han sido *Abies concolor* (Gordon & Glend.) Lindl. (Cosens, 1952), *Larix occidentalis* Nutt. (O'Hara y Valappil, 2000; Waring y O'Hara, 2005), *Picea glauca* (Moench) Voss. (Berry e Innes, 1967), *Picea sitchensis* (Bong.) Carr. (Herman, 1964; Deal *et al.*, 2003; Quine, 2004), *Pinus radiata* (Sutton y Crowe, 1975; Lange *et al.*, 1987; Hingston, 1990), *Pseudotsuga menziesii* (Collier y Turnblom, 2001), *Sequoiadendron giganteum* (Lindl.) Buchh. (O'Hara *et al.*, 2008) y *Sequoia sempervirens* (D. Don) Endl. (Dean *et al.*, 2007; O'Hara y Berrill, 2009). A pesar de la importancia de considerar la posibilidad de que los árboles respondan a las prácticas selvícolas produciendo este tipo de brotes, son pocos los trabajos que han prestado atención al impacto de estas formaciones en la calidad de la madera de las principales especies de coníferas de interés productivo en el ámbito europeo, entre las que se encuentran *Pinus radiata* y *Pinus pinaster*.

La mayoría de los aspectos comentados, relacionados con la poda para producir madera limpia, han sido evaluados principalmente en los países con mayor

experiencia en la obtención de madera de calidad. En ellos, se han desarrollado esquemas selvícolas adaptados a las principales especies productoras de su ámbito forestal, de cara a la maximización del rendimiento en madera libre de defectos. Así, por ejemplo, se han adoptado regímenes selvícolas óptimos que incluyen la realización de podas y claras (según la densidad de la plantación) en países como Nueva Zelanda (Maclaren, 1993; Private Forests Tasmania, 2004), Australia (England, 1998; Reid, 2002; Montagu *et al.*, 2003), Chile (Meneses y Guzman, 2000) y Argentina (Fenton, 1972; Valdivieso, 1990; Kurtz y Ferruchi, 2000).

En el caso concreto del noroeste peninsular, en donde *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* son dos de las coníferas de mayor interés productivo, no existen estudios previos detallados que aporten información sobre el efecto de distintas intensidades de poda (sola o combinada con claras), como práctica imprescindible para mejorar la calidad de su madera. Tan solo se pueden encontrar estudios de claras publicados para estas especies (p.e. Crecente *et al.*, 2005; Rojo *et al.*, 2005). En esta situación, no es posible establecer, para este ámbito geográfico, unas pautas selvícolas óptimas que permitan maximizar la producción de las masas de estas coníferas. Por ello, y dada la creciente demanda de madera de calidad a nivel mundial, y la potencialidad de las masas de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* en esta zona del territorio, resulta necesario efectuar una adecuada caracterización de la selvicultura que combine podas y claras para obtener un mayor conocimiento de estas intervenciones y mejorar las herramientas de gestión existentes a día de hoy para ambas especies.

Por todo ello, y dada la falta de trabajos de esta naturaleza en Asturias (noroeste peninsular), se ha planteado como **objetivo general** del presente capítulo la caracterización de la poda, bajo diferentes intensidades, en masas de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* de la región. Para ello, los **objetivos específicos** planteados, han sido: (1) seleccionar un criterio de poda práctico, que defina la intensidad real de poda realizada a nivel individual en ambas especies; (2) caracterizar las podas realizadas con distinta intensidad, diferenciando variables de copa y fuste; (3) evaluar el tamaño del centro con defectos para cada especie e intensidad de poda; (4) definir, en ambas coníferas, modelos de estimación del diámetro máximo sobre muñón a partir de variables dendrométricas sencillas; (5) estudiar la cicatrización de las heridas de poda para *Pinus radiata*; y (6) evaluar y caracterizar la aparición de brotes epicórmicos en ambas especies.

3.2. Material y métodos

3.2.1. Datos empleados

La evaluación de la intensidad real de poda y la caracterización de dicho tratamiento se llevaron a cabo tras la intervención realizada en el invierno de 2005-

2006 mediante la estimación de variables dendrométricas relacionadas con la copa remanente de los árboles y con el fuste podado (ramosidad y diámetro sobre muñón). Asimismo, en los años posteriores a la intervención de poda (desde el invierno 2007-2008 hasta el invierno 2009-2010) fue evaluado el efecto del tratamiento sobre la formación del centro con defectos, la cicatrización de las heridas de poda y la aparición de brotes epicórmicos. En todos los casos fueron utilizados datos procedentes de la red experimental de ensayos de podas y claras de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* del SERIDA, cuyas características han sido detalladas en el capítulo 2 y en el anexo de esta tesis.

3.2.1.1. Caracterización de la poda

Las ocho parcelas permanentes de ensayo fueron caracterizadas tras la realización de la primera poda (invierno 2005-2006), determinando las principales variables relacionadas con el tratamiento efectuado. Para ello, fueron medidas en los árboles centrales de cada subparcela de poda, las siguientes variables: número de verticilos vivos en la copa remanente (Nv_r), número de verticilos podados (Nv_p), número de ramas podadas (Nr_p), longitud de la copa (L_{copa}), diámetro de copa (D_{copa}), diámetro sobre muñón en el primer verticilo podado (DSM_i), diámetro sobre muñón en el último verticilo podado (DSM_f), altura a la que se encontraban dichos diámetros sobre muñón (h_{DSM_i} y h_{DSM_f}) y diámetro de las cuatro heridas de poda de mayor tamaño, una de cada cuadrante (dr_m) (Figura 3.1). El diámetro de copa fue evaluado en dos de los árboles centrales de cada subparcela de poda. También fueron determinados, en los árboles centrales de una parcela de cada especie (La Campa para *Pinus radiata* y Valsera para *Pinus pinaster*), el diámetro sobre muñón de mayor tamaño (DSM_m) y la altura del fuste podado a la que se encontraba dicho diámetro (h_{DSM_m}). Además de las variables anteriores, fueron estimadas en todos los árboles de las parcelas (centrales y bordes) las variables dendrométricas de diámetro normal (d), altura total (h) y altura de la base de la copa (h_{base}) tras la poda.

Los diferentes diámetros sobre muñón evaluados (DSM_j , correspondientes con DSM_i , DSM_f y DSM_m) fueron determinados con dos mediciones en cruz, mediante forcípula en los dos primeros inventarios y mediante Criterion RD1000 en el último inventario, siendo igualmente confirmada la precisión de las mediciones mediante forcípula hasta la altura alcanzable por el operador desde el suelo. Las alturas de ocurrencia de los diámetros sobre muñón (h_{DSM_j}) fueron determinadas con una pértiga telescópica o telescopio graduado para los dos primeros inventarios y con Vertex IV para el tercer inventario. El diámetro normal de los árboles (d) fue determinado con dos mediciones en cruz mediante forcípula y la altura total (h) así como la altura de la copa tras la poda (h_{base}) fueron medidas con Vertex III y Vertex IV. Finalmente, los diámetros de las cuatro heridas de poda de mayor tamaño (dr_m)

fueron medidos con dos mediciones en cruz, haciendo uso de una regla graduada o escalímetro.

3.2.1.2. Formación del centro con defectos

Los datos necesarios para el análisis de la formación del centro con defectos fueron tomados en algunos árboles centrales de las parcelas, en donde fue efectuada una remediación de los diámetros sobre muñón situados en el primer verticilo podado (DSM_i), último verticilo podado (DSM_j) y el verticilo podado de mayor grosor (DSM_m). Estos criterios coinciden con los establecidos para el índice de ramosidad BIX , donde la evaluación se restringe a la longitud del fuste podado en cada árbol.

Los valores de estos diámetros fueron tomados en todas las parcelas de ensayo tres años después de la poda (invierno 2008-2009), y tan solo en una parcela de cada especie (monte de La Campa para *Pinus radiata* y monte de Valsera para *Pinus pinaster*) cuatro años después del tratamiento (invierno 2009-2010). De la misma manera, se realizó la remediación del diámetro normal (d) y de la altura total (h) en los mismos pies en los que habían sido tomados los valores de los diferentes diámetros sobre muñón (DSM_j).

3.2.1.3. Cicatrización de las heridas de poda

Los datos de cicatrización de las heridas de poda fueron tomados únicamente en una de las parcelas de ensayo de *Pinus radiata* (monte de La Campa), en la que habían sido marcadas las cuatro heridas de mayor tamaño, una de cada cuadrante, en el momento inmediatamente posterior a la intervención (invierno 2005-2006). Estas mediciones fueron realizadas en los árboles centrales de cada subparcela de poda, de manera que excluyendo errores experimentales y árboles no conformes, fueron evaluados un total de 2.272 nudos procedentes de 568 árboles podados. Durante los inviernos 2007-2008 y 2008-2009 se llevó a cabo un seguimiento del cierre de las heridas. El diámetro de las heridas fue tomado mediante dos mediciones en cruz, con el uso de regla graduada o escalímetro, de precisión centimétrica. Asimismo, fueron contabilizadas las heridas totalmente ocluidas (observación diferenciada en el estadillo de campo), y fue determinada la localización de cada herida en el fuste. Para ello, fue evaluada la altura de ocurrencia de la herida de poda (h_{drm}), empleando una pértiga telescópica o telescopio graduado, siempre que fuera posible, o Vertex III para las heridas situadas en las zonas más altas del fuste podado. La posición de la herida en el fuste fue relacionada también con el cuadrante del árbol en el que se encontraba, identificando cada cuadrante con su dirección geográfica (Figura 3.1). En algunos casos, la evaluación de las heridas situadas en la parte superior del tronco tuvo que ser realizada con ayuda de una escalera de aluminio de 2,4 metros de altura.

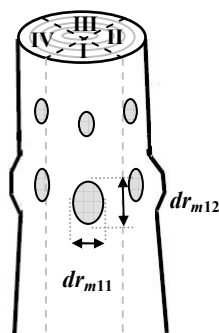


Figura 3.1. Identificación de la herida de mayor tamaño situada en cada cuadrante del fuste podado para el cálculo del índice de ramosidad *BIX*. En la figura, dr_{m11} y dr_{m12} se corresponden con los diámetros cruzados de la herida podada de mayor tamaño situada en el cuadrante I, cuyo diámetro medio será dr_{m1} . Fuente: Elaboración propia, adaptado de Inglis y Cleland (1982).

3.2.1.4. Brotes epicórmicos

La muestra empleada en esta parte del trabajo estuvo conformada por todos los pies disponibles en los ensayos (centrales y bordes). De todos ellos, fueron seleccionados finalmente aquellos árboles que no presentasen, en el momento de la evaluación, ningún tipo de defecto importante en la forma del árbol o problema sanitario, evitando así utilizar datos procedentes de árboles que pudieran ser susceptibles a la formación de brotes epicórmicos por otros motivos. De esta manera, el total de árboles podados evaluados en el tiempo de estudio fue de 5.425 para *Pinus radiata* y de 6.002 para *Pinus pinaster*.

En el invierno 2007-2008, dos años después de la intervención, se llevó a cabo un muestreo para evaluar la aparición de brotes epicórmicos en las ocho parcelas de ensayo. Una vez efectuada la medición de los brotes, éstos se mantuvieron en el fuste, estando planificada la eliminación de los mismos durante la segunda intervención de poda (segunda fase experimental de los ensayos) con el fin de economizar esta actividad.

La caracterización de los brotes se centró en la sección del fuste comprendida entre la base del árbol y el último verticilo podado (no siendo caracterizada la sección del fuste por encima de dicho verticilo). Se diferenciaron los brotes por su estado, posición, extensión, tamaño y orientación en el fuste (Figura 3.2).

La metodología de inventario de los brotes y del resto de variables dendrométricas empleadas en este estudio se encuentra descrita con mayor detalle en el capítulo 2. La evaluación del tamaño y grosor de los brotes epicórmicos fue realizada únicamente para los brotes extendidos (con tallo), midiendo su diámetro en la inserción (*Dbe*), con calibre digital de precisión milimétrica, y su longitud (*Lbe*), con escalímetro o regla graduada de precisión centimétrica.

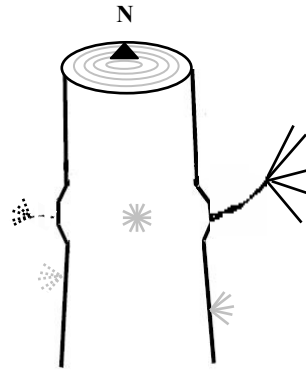


Figura 3.2. Representación del tipo de formaciones epicórmicas en función de las características consideradas en este trabajo. En color negro se muestran dos brotes extendidos: uno grueso, largo y vivo, orientado al este (derecha); el otro fino, corto y muerto, orientado al oeste. Ambos brotes se encuentran situados en un verticilo y son originados en un nudo. En color gris se representan tres brotes no extendidos: uno vivo, situado en un verticilo, entre nudos y orientado al sur (gris, centro); otro vivo, situado entre verticilos y orientado al este (gris, derecha); y el último muerto, situado entre verticilos, orientado al oeste (gris, izquierda). Los brotes en estado vivo se muestran con líneas continuas y los muertos con líneas discontinuas. Fuente: Elaboración propia.

3.2.2. Tratamiento y análisis de los datos

Todos los análisis estadísticos fueron realizados con el programa estadístico SAS 9.1[®] (SAS Institute Inc., 2004 a;b), siendo empleado SigmaPlot 10.0[®] (Systat Software Inc., 2006) para la representación gráfica de los resultados. Considerando el conjunto de variables evaluadas en las parcelas permanentes desde su instalación en el invierno 2005-2006 hasta el invierno 2009-2010, se han generado diversas bases de datos con más de 123.000 entradas cuyo análisis, en función de los objetivos planteados, se detallan a continuación.

3.2.2.1. Caracterización de la poda

3.2.2.1.1. Intensidad real de poda a nivel individual

Inicialmente fue evaluado el porcentaje real de poda aplicado en cada árbol de forma individual. Para ello, fueron estimados los valores medios, en porcentaje, del número de verticilos vivos (Nv_v) y totales (Nv_t) (suma de verticilos vivos y podados), así como de la altura total, que fueron eliminados en la poda. Estos valores fueron relacionados con los tratamientos definidos en el diseño experimental, seleccionando así un criterio de intensidad real de poda que se ajustara a las intensidades planteadas inicialmente en el diseño (0%, 20% y 40% de L_{copa_v}).

3.2.2.1.2. Valores relacionados con la copa y el fuste podado (ramosidad y diámetro sobre muñón)

Los tratamientos de poda efectuados fueron caracterizados para cada especie. Para ello, se llevó a cabo un primer análisis de varianza (ANOVA) considerando

variables de la copa (h_{base} , L_{copa} , D_{copa}) y el fuste (Nv_p , Nr_p , BIX), así como variables relacionadas con el diámetro sobre muñón y la evaluación de la calidad de la poda (DSM_f , DSM_m , h_{DSMm}). La metodología de cálculo del índice de ramosidad fue descrita en el capítulo 2. Todos los diámetros fueron determinados como la media aritmética de las dos mediciones en cruz realizadas. Este análisis de varianza fue efectuado mediante el procedimiento MIXED del paquete estadístico SAS/STAT® (SAS Institute Inc., 2004b), con un intervalo de confianza del 95%, empleando el test de Tukey de comparación de medias. En dicho análisis, fueron empleados como factores fijos la intensidad real de poda y el sitio de ensayo, y como factor aleatorio la subparcela de poda. Las características dasométricas y metodología de cálculo empleada fueron descritas en el capítulo 2. Como intensidad real de poda fue utilizado el criterio seleccionado previamente, agrupado en 15%, 30% y 45%.

Por otra parte, se llevó a cabo la representación gráfica de las distribuciones de las variables BIX , DSM_f , DSM_m y h_{DSMm} , en cada especie, para una mejor caracterización de la calidad de la poda.

En un paso posterior fue realizado un análisis de correlación entre los diferentes diámetros sobre muñón evaluados, DSM_j (DSM_i , DSM_f y DSM_m), y las principales variables dendrométricas tomadas en campo (d , h , L_{copa} , h_{base} , D_{copa}). Para ello, se calculó el coeficiente de correlación de Pearson, expresando cuantitativamente hasta qué grado se relacionaban las variables consideradas en el análisis para un nivel de significación del 1%. Este análisis fue realizado mediante el procedimiento CORR del paquete estadístico SAS/STAT® (SAS Institute Inc., 2004b) para la situación inmediatamente posterior a la poda, momento en el que tan solo se contaba con datos de DSM_m en una parcela de cada especie (monte de La Campa para *Pinus radiata* y monte de Valsera para *Pinus pinaster*).

Por último, con el objetivo de facilitar la estimación del DSM_m en ambas coníferas, y de acuerdo con las relaciones obtenidas en el análisis anterior, fue ajustado un modelo lineal que relacionase el valor del DSM_m con alguna variable dendrométrica sencilla de medir en campo. El ajuste de dicho modelo fue efectuado mediante mínimos cuadrados ordinarios (OLS, término en inglés “*Ordinary Least Squares*”) utilizando el procedimiento MODEL del paquete estadístico SAS/ETS® (SAS Institute Inc., 2004a). Finalmente fue evaluado el comportamiento de los modelos mediante su análisis gráfico y estadístico. En el primer caso, fueron representados los residuos frente a los valores predichos y los valores observados frente a los predichos, mientras que en el segundo tipo de análisis fueron utilizados los estadísticos de raíz cuadrada del error medio cuadrático ($REMC$) y coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}). Dada la limitada muestra para estos modelos, perteneciente tan solo a una parcela de cada especie, no fue realizada la validación de los modelos, debiendo efectuar dicha validación en un estudio posterior.

3.2.2.2. Formación del centro con defectos

Para evaluar la evolución del fuste podado que contiene los defectos fue realizado un análisis de correlación incluyendo el valor de los diferentes DSM_j caracterizados en los años sucesivos a la poda (inviernos 2008-2009 y 2009-2010), junto con otras variables dendrométricas sencillas (d , h , L_{copa} , h_{base} , D_{copa}) tomadas en esos mismos inventarios. Para ello, fue calculado nuevamente el coeficiente de correlación de Pearson, para un nivel de significación del 1%. Este análisis fue efectuado mediante el procedimiento CORR del paquete estadístico SAS/STAT® (SAS Institute Inc., 2004b). La consideración de estas relaciones tan solo fue posible, para las ocho parcelas de ensayo, en el inventario realizado tres años después de la poda (invierno 2008-2009) ya que, tal y como se indicó con anterioridad, el valor del DSM_m en el resto de inventarios (inviernos 2005-2006 y 2009-2010) únicamente había sido tomado en una parcela de cada especie (monte de La Campa para *Pinus radiata* y monte de Valsera para *Pinus pinaster*).

Por otra parte, dado que se contaba con datos de DSM_m en los tres inventarios para las dos parcelas comentadas (monte de La Campa para *Pinus radiata* y monte de Valsera para *Pinus pinaster*), fue representada la relación entre dichos diámetros sobre muñón en los diferentes momentos inventariados.

Por último, fue realizado un ANOVA para los diferentes incrementos anuales de los DSM_j evaluados en campo (ic_DSM_i , ic_DSM_f , ic_DSM_m), para cada especie e intensidad real de poda. Los crecimientos en diámetro sobre muñón de cada árbol (ic_DSM_i , ic_DSM_f , ic_DSM_m) fueron determinados como incrementos medios anuales o crecimientos corrientes, cuya metodología de cálculo se encuentra recogida en el capítulo 2. La poda real (agrupada en 15%, 30% y 45%) y la parcela fueron incluidas como factores fijos, y la subparcela de poda como factor aleatorio. También fue introducido como covariable el diámetro sobre muñón en el momento inicial (situación inmediatamente posterior a la poda), con el fin de homogeneizar la muestra utilizada en el análisis sobre el crecimiento en diámetro sobre muñón. Para este análisis fue empleado el procedimiento MIXED del paquete estadístico SAS/STAT® (SAS Institute Inc., 2004b), considerando el test de Tukey de comparación de medias con un intervalo de confianza del 95%.

3.2.2.3. Cicatrización de las heridas de poda

El seguimiento de las cuatro heridas de poda de mayor tamaño, seleccionadas tras la intervención, permitió determinar el porcentaje de heridas que habían mostrado su cierre completo en cada inventario realizado, relacionando dicho porcentaje de oclusión con el tamaño de la herida tras el tratamiento (clase de diámetro de la herida, $Clase\ dr_m$), la intensidad real de poda (agrupada en 15%, 30% y 45%), el

grosor del árbol podado (clase diamétrica, *C.D.*) y su situación en el fuste (cuadrante del tronco: norte, sur, este, u oeste).

Por otra parte, fue realizado un análisis de correlación entre la velocidad de oclusión de las heridas (o_{dr_m}), variables descriptivas de las heridas (dr_m , h_{drm}) y algunas de las principales variables daso y dendrométricas (d , h , N , G , d_g , H_0 , D_0, \dots), así como diversos índices de competencia independientes de la distancia (Rd_g , Rd_m , RD_0) en el momento inmediatamente posterior a la poda. Asimismo, fue evaluada la relación existente entre dicha velocidad de cierre, o_{dr_m} , y los crecimientos corrientes en diámetro (ic_d), altura (ic_h) y diámetro sobre muñón (ic_{DSM_i} , ic_{DSM_f} , ic_{DSM_m} , ic_{DSM_j}). La determinación de todas estas variables ha sido explicada en el capítulo 2 de la tesis. Para el análisis de correlación fue utilizado el procedimiento CORR del paquete estadístico SAS/STAT® (SAS Institute Inc., 2004b), calculando el coeficiente de correlación de Pearson con un nivel de significación del 1%.

3.2.2.4. Aparición de brotes epicórmicos tras la poda

Para el estudio de la aparición de brotes epicórmicos en *Pinus radiata* y *Pinus pinaster*, fue cuantificada la frecuencia con la que habían sido desarrolladas estas formaciones epicórmicas en el total de los árboles de los ensayos evaluados. Como valor de referencia del tamaño del brote fue establecido 10 cm, por considerarse una longitud apreciable de este tipo de formaciones, acorde con los tamaños de los brotes observados en las parcelas evaluadas. En un primer paso, fue analizado el número medio de brotes epicórmicos por árbol en función del grosor del árbol (agrupado en *C.D.*), el tamaño de la copa (clasificado en clases de L_{copa}), el sitio de ensayo, la posición en el tronco (altura del fuste y orientación) y la intensidad real de poda (agrupada en 15%, 30% y 45%). Para el análisis del número medio de brotes por árbol (Nbe), fue dividido el fuste podado en seis secciones iguales, siendo la 1ª sección la más cercana al suelo y la 6ª la más cercana a la copa. Para estimar dichas secciones fue empleada la variable Nv_p en cada árbol, dado que no se contaba con información de la altura del fuste a la que se encontraba cada uno de los brotes epicórmicos.

Para determinar el efecto de la especie, el sitio de ensayo y la intensidad real de poda en la aparición de brotes epicórmicos, considerando el número medio de brotes epicórmicos por árbol, fue efectuada una comparación de medias mediante el test no paramétrico de Kruskal-Wallis dado que muchos de los pies contaban con cero brotes. Para ello, los factores de especie, sitio de ensayo e intensidad de poda fueron empleados de uno en uno como la variable categórica del análisis.

En un segundo paso, se llevó a cabo una caracterización más específica de los brotes, considerando su estado (vivo, Nbe_v ; muerto, Nbe_m), posición en el fuste

(entre verticilos, Nbe_evert ; en un verticilo, Nbe_vert), extensión (extendido Nbe_ex ; no extendido Nbe_Nex) y tamaño (largo, Nbe_l ; corto, Nbe_c ; grueso, Nbe_g ; fino, Nbe_f).

Adicionalmente fue realizada una diferenciación de los brotes en función de su longitud ($Lbe > 10\text{cm}$ y $Lbe < 10\text{ cm}$) para evaluar las características de los árboles que presentan ese tipo de brotes, dada la importancia del defecto que pueden causar aquellas formaciones de mayor longitud sobre la calidad de la madera. Con esta diferenciación, fueron evaluadas las variables de d , h y L_{copa} de los árboles pertenecientes a cada una de esas categorías de Lbe , en función de la intensidad real de poda y el sitio de ensayo. Para las variables relacionadas con el tamaño de los brotes (Dbe y Lbe) fue efectuado un ANOVA, incluyendo la poda real (agrupada en 15%, 30% y 45%) y la parcela fueron como factores fijos, y la subparcela de poda como factor aleatorio. También fue considerada la interacción entre los factores poda y parcela. Este análisis fue realizado mediante el procedimiento MIXED del paquete estadístico SAS/STAT[®] (SAS Institute Inc., 2004b), considerando el test de Tukey de comparación de medias con un intervalo de confianza del 95%.

3.3. Resultados y discusión

3.3.1. Caracterización de la poda

3.3.1.1. Intensidad real de poda a nivel individual

Tomando como referencia la intensidad de poda diseñada en gabinete, se determinó el porcentaje real de poda aplicado en campo a nivel de árbol individual. En la Tabla 3.1 se muestra, para cada tratamiento diseñado (según % de copa viva eliminada), el valor medio de la intensidad real de poda efectuada en cada pie intervenido, expresando dicha intensidad como el número de verticilos vivos podados, el número de verticilos totales eliminados y la altura total podada para cada especie.

De todas las variables dendrométricas evaluadas en el primer inventario, y de acuerdo con lo mostrado en la Tabla 3.1, se optó por seleccionar la altura total (h) como variable de referencia de la intensidad real de poda, por ser una variable fácil de cuantificar en campo, cuya utilización en éste y futuros inventarios supone un menor tiempo y coste de ejecución, además de presentar un menor error experimental respecto a la contabilización de verticilos (Nv_v , Nv_t) en los fustes. Considerando la altura total como criterio de poda y, a la vista de los resultados medios obtenidos para los tratamientos efectuados y del número de árboles disponibles, se establecieron tres clases para el porcentaje de altura eliminada,

variable denominada en adelante *Severidad poda*: 15% ($\leq 15\%$), 30% ($> 15\%$ y $\leq 30\%$) y 45% ($> 30\%$).

Tabla 3.1. Intensidad real de poda cuantificada mediante el porcentaje medio eliminado de verticilos vivos, verticilos totales y altura total, asociada a los tratamientos de poda definidos en el diseño experimental (0%, 20% y 40% de copa viva).

Especie	Intensidad poda diseñada	Intensidad real de poda (%)		
		Nv_v	Nv_t	h
<i>Pinus radiata</i>	0	0	18	17
	20	18	35	28
	40	20	38	36
<i>Pinus pinaster</i>	0	0	16	14
	20	21	36	24
	40	34	49	40

donde *Intensidad poda diseñada* se corresponde con la intensidad de poda diseñada en función de la L_{copa_v} , en %; *Intensidad real poda* es la intensidad real de poda, valorada a través de las variables: media de verticilos vivos (Nv_v), media de verticilos totales (Nv_t) y media de altura total (h) eliminados, todos ellos expresados en %.

3.3.1.2. Variables relacionadas con la copa

En la Tabla 3.2 se recogen los valores de las principales variables de copa (h_{base} , L_{copa} y D_{copa}) caracterizadas en cada árbol en el momento inmediatamente posterior a la poda (invierno 2005-2006).

Tabla 3.2. Valores medios y desviación estándar (entre paréntesis) de h_{base} , L_{copa} y D_{copa} , obtenidos en las parcelas permanentes de podas y claras de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* para el inventario realizado inmediatamente después de la poda (invierno 2005-2006), asociado a las intensidades reales de poda agrupadas en severidades del 15%, 30% y 45%. Distintas letras indican diferencias significativas en el test de comparación de medias de Tukey ($\alpha = 95\%$).

Especie	Severidad poda	h_{base}	L_{copa}	D_{copa}
<i>Pinus radiata</i>	15	0,88 (0,40) ^c	7,06 (2,19) ^a	3,22 (0,61) ^a
	30	1,80 (0,62) ^b	5,92 (1,69) ^b	2,77 (0,59) ^b
	45	2,92 (0,95) ^a	4,86 (1,58) ^c	2,39 (0,55) ^c
<i>Pinus pinaster</i>	15	0,63 (0,21) ^c	4,79 (1,27) ^a	2,79 (0,63) ^a
	30	1,21 (0,36) ^b	3,86 (0,98) ^b	2,41 (0,58) ^a
	45	2,01 (0,67) ^a	2,96 (0,91) ^c	2,41 (0,75) ^a

donde h_{base} es el valor medio de la altura de la base de la copa, en m; L_{copa} es el valor medio de la longitud de la copa, en m; D_{copa} es el valor medio del diámetro de copa, en m; y *Severidad poda* es la intensidad real de poda, en %.

El análisis de varianza de los distintos parámetros de copa evaluados para el factor severidad de poda puso de manifiesto que tanto en *Pinus radiata* como en *Pinus pinaster* existen diferencias significativas para la variable h_{base} tras aplicar cada porcentaje de poda. Tal y como se esperaba, a mayor severidad del tratamiento el valor promedio de h_{base} fue superior para ambas coníferas. Las variables L_{copa} y D_{copa} , sin embargo, mostraron menores valores medios a mayor intensidad real del tratamiento. La primera variable (L_{copa}) fue estadísticamente diferente para la severidad de poda, en ambas especies, mientras que la segunda variable (D_{copa}) tan solo mostró diferencias significativas para *Pinus radiata*. Este resultado podría ser debido a la mayor conicidad de la copa de esta conífera, en comparación con *Pinus pinaster*, pudiendo dar lugar a una mayor diferencia entre los diámetros de copa de los distintos tratamientos de poda efectuados. Los valores medios de todas las variables mostraron mayores valores para *Pinus radiata* que para *Pinus pinaster*, a excepción de D_{copa} para la severidad de poda del 45%.

3.3.1.3. Variables relacionadas con el fuste podado: ramosidad

En la Tabla 3.3 se muestran los valores de las principales variables relacionadas con la ramosidad (Nv_p , Nr_p y BIX), medidas en el momento inmediatamente posterior a la poda (invierno 2005-2006).

Tabla 3.3. Valores medios y desviación estándar (entre paréntesis) de las variables Nv_p , Nr_p y BIX , obtenidas en los ensayos de podas y claras de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster*, en el inventario realizado inmediatamente después de la poda (invierno 2005-2006), y asociado a las intensidades reales de poda agrupadas en severidad del 15%, 30% y 45%. Distintas letras indican diferencias significativas en el test de comparación de medias de Tukey ($\alpha=95\%$).

Especie	Severidad poda	Nv_p	Nr_p	BIX
<i>Pinus radiata</i>	15	1,17 (1,04) ^c	6,06 (5,32) ^c	1,54 (0,92) ^c
	30	3,18 (1,51) ^b	17,07 (8,75) ^b	2,42 (0,90) ^b
	45	4,91 (1,91) ^a	26,98 (11,30) ^a	2,73 (0,94) ^a
<i>Pinus pinaster</i>	15	0,94 (0,99) ^c	4,83 (3,93) ^b	1,32 (0,54) ^b
	30	1,35 (1,29) ^b	6,51 (6,23) ^b	1,39 (0,64) ^b
	45	2,85 (1,52) ^a	14,37 (8,39) ^a	1,66 (0,68) ^a

donde Nv_p es el número medio de verticilos podados; Nr_p es el número medio de ramas podadas; BIX es el valor del índice de ramosidad, para el largo del fuste podado, en cm; y *Severidad poda* es la intensidad real de poda, en %.

De acuerdo con la tabla anterior, el número medio de ramas y verticilos podados (Nr_p y Nv_p , respectivamente) aumentó a mayor severidad de poda. Las diferencias mostradas entre tratamientos fueron significativas en todos los casos salvo para la variable Nr_p y el índice BIX en los tratamientos de severidades del 15% y 30% en

Pinus pinaster. De forma comparativa para las dos especies estudiadas, los tratamientos de poda efectuados en las masas de *Pinus radiata* mostraron un mayor valor promedio de Nr_p y Nv_p que en el caso de *Pinus pinaster*.

Las diferencias para las variables Nr_p y Nv_p , en ambas coníferas, fueron menores para el tratamiento de poda más débil (severidad de poda del 15%). Una gran cantidad de árboles clasificados dentro de este tratamiento (15%) tan solo presentaban uno o dos verticilos podados, en los que las ramas eliminadas se encontraban en estado seco o muerto. El valor medio del índice de ramosidad BIX , estimado para el total del fuste podado, mostró mayores valores a mayor intensidad de poda, con diferencias significativas para todos los tratamientos a excepción de las podas del 15% y 30% para *Pinus pinaster*. Por otra parte, se pudo observar que las ramas eliminadas en *Pinus radiata* presentaban un mayor tamaño medio, en comparación con las ramas podadas en *Pinus pinaster* (Tabla 3.3). Así, los valores más frecuentes de BIX para *Pinus radiata* se encontraron entre los 2 cm y 3 cm, con un BIX medio de 2,5 cm, mientras que los valores de BIX para *Pinus pinaster* estuvieron comprendidos mayormente entre 1 cm y 2 cm, siendo el BIX medio de 1,6 cm (Figura 3.3). Es importante puntualizar que para una correcta estimación de este índice de ramosidad, y su comparación entre especies o tratamientos de poda, como en este caso, sería necesaria la determinación de su valor para una misma longitud de troza (longitudes normalmente acordes con su posterior uso industrial (2,5-3 m para una troza podada o 5-6 m para dos trozas podadas). Por ello, y dado que en el presente estudio han sido definidas longitudes de troza variables en función de la altura de poda alcanzada en cada árbol de forma individual, los valores aquí presentados deben ser considerados como preliminares, a la espera de futuros estudios que definan la ramosidad para iguales longitudes de troza, y en los que además sean considerados otros factores determinantes de la ramosidad del árbol como las propias características genéticas o la densidad de la masa.

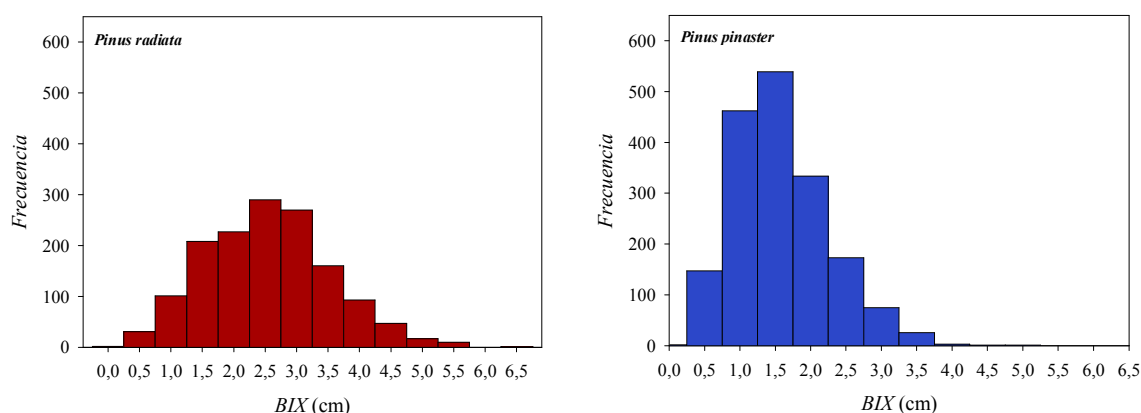


Figura 3.3. Distribución del índice de ramosidad BIX en los ensayos de *Pinus radiata* (izquierda, rojo) y *Pinus pinaster* (derecha, azul) estudiados.

De acuerdo con estos datos, y atendiendo tan solo al tamaño de las heridas de poda, podemos asumir que resulta esperable un mejor resultado para madera estructural en *Pinus pinaster* que en *Pinus radiata*, gracias al menor tamaño medio de las heridas que definen el índice de ramosidad *BIX* en esta especie.

Según Knowles y Kimberley (1992), el tamaño de las ramas es reconocido como una de las características más importantes en la clasificación de la calidad de las trozas no podadas. Los mismos autores señalan que el diámetro de las ramas incide directamente en el tamaño final que presentan los nudos en la madera. Pinkard y Beadle (1998b) así como Wardlaw y Neilsen (1999), apuntan también a una estrecha relación entre el diámetro de las ramas y los defectos que pueden ser encontrados en la madera. De esta manera, ramas de mayor diámetro generan a su vez nudos de mayor tamaño, los cuales reducen considerablemente la resistencia de la madera, situación de importancia cuando la madera ha sido destinada a usos estructurales. En este contexto, la madera adquiere una baja calificación en relación con su calidad al presentar nudos de gran tamaño, especialmente en aquellos casos en que la madera es sometida tanto a pruebas de flexión, como a rigurosas evaluaciones visuales. Estas indicaciones están siendo confirmadas recientemente en los estudios realizados de forma paralela a la presente tesis doctoral, empleando para ello el material extraído de las claras efectuadas durante la segunda fase experimental de los ensayos. Inglis y Cleland (1982) señalan que en el caso particular de Nueva Zelanda, el sistema de modelización STANDPAK considera el índice de ramas como una medida estándar del diámetro de ramas. Knowles y Kimberley (1992) señalan que a pesar de que el sistema de modelización STANDPAK procesa la información para estimar el índice de ramas medio, éste más tarde realiza una clasificación de trozas por calidad, basado principalmente en el tamaño de la rama de mayor tamaño. En relación con esto, probablemente una de las variables más importantes a considerar en la definición del potencial de producción de madera estructural de un rodal gestionado para producir madera de calidad sea el índice de ramosidad, siendo además imprescindible determinar qué porcentaje del volumen total de las trozas será el que contenga las ramas. Todos estos aspectos, a su vez, dependerán directamente de la gestión de podas y claras, y la selección de árboles de porvenir efectuada en la masa.

El empleo del índice *BIX* para el estudio de la ramosidad ha mostrado una relación clara con la densidad en trabajos como el de Tombleson e Inglis (1986). Otros estudios han observado la relación del *BIX* con el genotipo (Waghorn *et al.*, 2007), las densidades inicial (Inglis y Cleland, 1982; Waghorn *et al.*, 2007) y final de la masa (Tombleson *et al.*, 1991), así como otras variables dendro y dasométricas, como el diámetro normal a los 20 años de edad, la inversa de la altura dominante al final del período de clara, el índice de sitio o la altura de la troza. Uno de los trabajos más completos en esta temática ha sido el desarrollado por Mason (2005), quien

muestra un modelo predictivo del índice *BIX* de acuerdo con el cual el valor de este índice para la segunda troza muestra ser inferior con la calidad de sitio y la densidad de la masa. Por tanto, dada la influencia de las claras en la densidad, así como en el valor del índice *BIX*, de acuerdo al trabajo de Mason (2005), sería esperable que los resultados aquí mostrados adquirieran una mayor relevancia tras la evaluación de la segunda fase experimental de los ensayos evaluados, en donde se podrá obtener además información sobre las intensidades de los tratamientos de podas y claras más adecuados para incrementar los beneficios de ambas prácticas selvícolas en la obtención de madera de calidad.

La presencia de ramas de mayor tamaño en un árbol implica mayores costes de poda, dificulta la realización de los cortes de poda y demora la oclusión de las heridas. En este sentido, algunos trabajos (p.e. CRPF, 2002) han indicado como valor límite para el correcto corte de las ramas y el cierre rápido de las heridas grosores de rama de 3 cm de diámetro en su inserción (Gadgil y Bawden, 1981; Glass y McKenzie, 1989; Gerrand *et al.*, 1997; Wardlaw y Neilsen, 1999; Mohammed *et al.*, 2000).

Asimismo, para maximizar los beneficios de la poda y reducir el tiempo de oclusión de las heridas ha sido ampliamente apuntada la importancia de que las ramas podadas se encuentren en estado vivo (p.e. Gadgil y Bawden, 1981; Glass y McKenzie, 1989; Gerrand *et al.*, 1997; Wardlaw y Neilsen, 1999; Mohammed *et al.*, 2000). Si el potencial y las condiciones de crecimiento fueran las mismas sería probable una cicatrización más lenta para *Pinus radiata* que para *Pinus pinaster*, dada la mayor frecuencia de heridas de poda con tamaños por encima del límite comentado (Figura 3.3). A pesar de que el diámetro de las heridas de poda observadas en este trabajo para *Pinus radiata* fue, en algunos casos, superior a 3cm, el valor del *BIX* para la longitud del fuste podado resultó comparativamente inferior al mostrado para esta misma especie en otros estudios. Ejemplo de ello es el trabajo de Romano (2002), quien determinó que los valores del índice de ramosidad *BIX* para *Pinus radiata* fundamentalmente se concentraban entre los 2,5 cm y 4cm, con un *BIX* medio de 3,5 cm. Aun así, debemos considerar que el resultado de la poda efectuada en las parcelas de *Pinus radiata* hubiera mejorado si dicha intervención hubiera sido realizada con anterioridad.

Este tipo de ramas más gruesas conlleva, además, un mayor tamaño del centro con defectos y una menor cantidad de madera limpia al final del turno para un mismo diámetro de corta, lo que puede llegar a suponer una pérdida económica importante si no se considera la ramosidad del árbol en la selección de los pies a podar. Por todo lo comentado, y tal y como ha indicado Bier (1986), a medida que aumente el valor del índice *BIX* la calidad final de la troza se verá reducida.

3.3.1.4. Variables relacionadas con el fuste podado: diámetro sobre muñón

Las variables de los diámetros sobre muñón inicial (DSM_i) y final (DSM_f) mostraron, por lo general, mayores valores para *Pinus radiata* que para *Pinus pinaster*. Así, los valores más frecuentes del DSM_i estuvieron comprendidos entre 12,5-17,5 cm para *Pinus radiata* y 7,5-12,5 cm para *Pinus pinaster*, mientras que los valores de DSM_f más frecuentes fueron 10-15 cm para *Pinus radiata* y 7,5-10 cm para *Pinus pinaster* (Figura 3.4). Los valores medios de estos diámetros sobre muñón obtenidos en las parcelas de *Pinus radiata* fueron de 14,4 cm para el DSM_i y de 13,3 cm para el DSM_f , mientras que para *Pinus pinaster* estos valores fueron de 11,3 cm para el DSM_i y de 9,9 cm para el DSM_f .

Atendiendo a la intensidad de poda efectuada, el DSM_f mostró diferencias significativas para todas las intensidades ($p < 0,0001$), con menores diámetros a mayor severidad del tratamiento en ambas especies (valores medios de 10,63 cm y 9,40 cm para la severidades del 30% y 45% en *Pinus pinaster*; y de 13,64 cm y 12,33 cm para las podas del 30% y 45% en *Pinus radiata*).

En la Figura 3.4 se muestra la distribución del DSM_f en el momento inmediatamente posterior a la poda (invierno 2005-2006) para ambas especies.

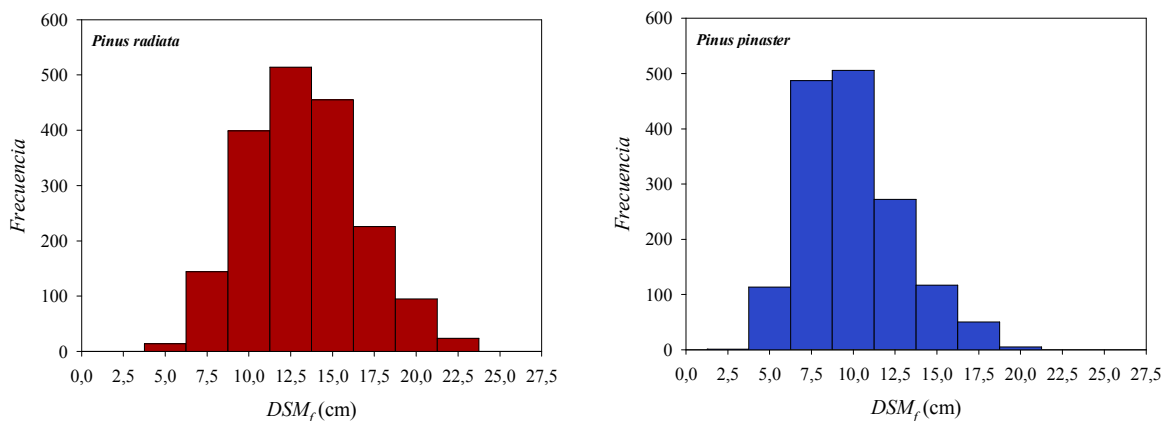


Figura 3.4. Distribución del diámetro sobre muñón en el último verticilo podado (DSM_f) para los ensayos permanentes de *Pinus radiata* (izquierda, color rojo) y *Pinus pinaster* (derecha, color azul) estudiados.

El valor del DSM_f ha sido empleado en países como Nueva Zelanda, como criterio de referencia del momento de poda más oportuno. Con ese planteamiento, resulta adecuado conocer el valor de dicho diámetro en el momento de la intervención, de manera que si se un valor excesivo indicaría una poda tardía, con un gran tamaño del centro con defectos, mientras que un valor demasiado bajo indicaría una poda temprana con el posible riesgo sobre el crecimiento posterior del árbol. De acuerdo con esto, y atendiendo a los resultados obtenidos en el presente trabajo, los valores del DSM_f fueron significativamente inferiores a mayor severidad de poda,

con diferencias medias de entre 1,2 cm y 1,3 cm para los tratamientos de severidades del 30% y 45% en *Pinus pinaster* y *Pinus radiata*, respectivamente.

Por otra parte, para ambas especies, se observaron mayores valores del DSM_i que del DSM_f . Estas diferencias, en el momento de la poda, resultan lógicas por la mayor conicidad del árbol en su parte inferior. En este sentido, existen diversos estudios que han observado la pérdida de conicidad del fuste tras la realización de la poda, justificando este hecho por el mayor crecimiento producido en la zona superior del tronco, más cercana a las ramas de la copa, conformando así fustes con formas más cilíndricas tras la poda (p.e. Lange *et al.*, 1987; O'Hara, 1991; Muhairwe, 1994; De Montigny y Stearns-Smith, 2001). Sin embargo, es importante aclarar que habitualmente en esos trabajos se realiza la evaluación de diámetros del fuste sin considerar los defectos presentes en el mismo (p.e. los debidos a los verticilos), siendo esperable, tal y como se verá en el capítulo 4, un comportamiento diferente para las zonas del tronco con defectos, que son además las partes de mayor importancia para la caracterización de la calidad de la madera producida, por ser realmente determinantes en el tamaño del centro con defectos y, por ende, en el volumen de madera limpia producida al final del turno.

Otro aspecto destacable en relación con el valor del diámetro sobre muñón determinado en el momento posterior a la poda es la importancia de definir su valor en el verticilo podado de mayor grosor (DSM_m), por ser éste el diámetro con mayor influencia en el tamaño final del centro con defectos y por tanto en el inicio de la formación de madera limpia. Por ello, esta variable ha sido empleada para la evaluación de la poda de diversas especies forestales en países con amplia experiencia como Nueva Zelanda, Australia, Chile o Argentina (p.e. Maclaren, 1993; Fassola *et al.*, 1999 c;e; Villalobos, 2005; Barrera, 2007). En esos casos, su valor ha sido determinado con el fin de definir el esquema de poda más adecuado para la obtención de una mayor cantidad de madera limpia al final del turno. Para ello, el conocimiento de esta variable permite mantener su valor lo más aproximado posible entre sucesivas intervenciones de poda, y determinar la viabilidad de la operación en función de su tamaño.

En el presente trabajo, el valor más frecuente de DSM_m en el momento inmediatamente posterior a la poda, evaluado en una parcela de cada especie (monte de La Campa para *Pinus radiata* y monte de Valsera para *Pinus pinaster*), se situó en torno a los 12,5-17,5 cm para *Pinus radiata*, y 7,5-12,5 cm para *Pinus pinaster* (Figura 3.5). Los valores medios de esta variable fueron 15,7 cm para *Pinus radiata* y 10,8 cm para *Pinus pinaster*.

Aunque será necesario evaluar en un futuro un mayor rango de sitios podados para la determinación del DSM_m en el momento de la poda, en este caso, tal y como se puede observar en la Figura 3.5, en ambas especies hubo algunos árboles con

DSM_m de gran tamaño en el momento de la poda, siendo este hecho más frecuente para *Pinus radiata*. Hay que recordar, además, que el valor de DSM_m tomado en el momento de la intervención tan solo pudo ser medido para una parcela de cada especie, pudiendo llegar a ser ligeramente diferente este valor para el conjunto de los ensayos estudiados. También se debe considerar que en esta parte del trabajo han sido medidos todos los árboles centrales pertenecientes a los ensayos, independientemente de su proximidad a claros dentro de la masa, por lo que los pies con un mayor espacio disponible podrían haber tenido mayores engrosamientos diametrales y de las ramas, dando lugar a valores del DSM_m superiores a la media.

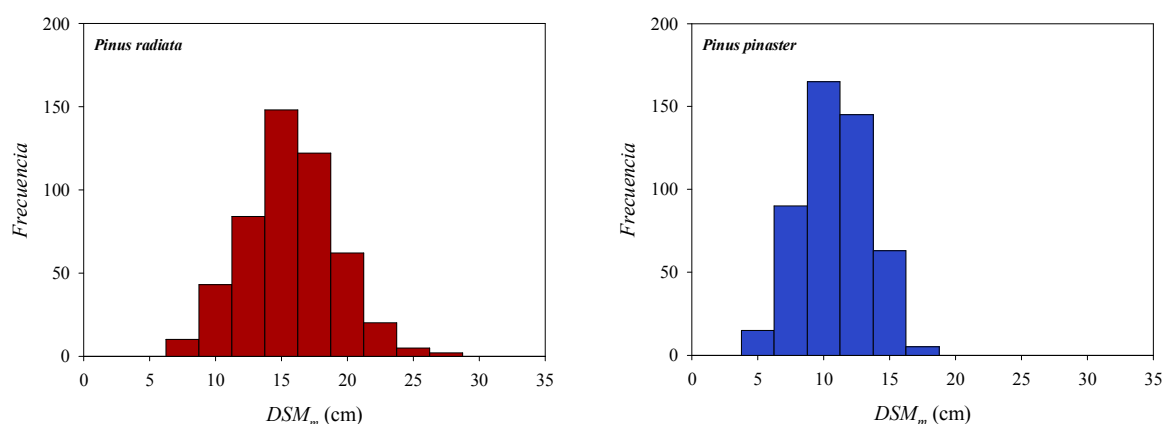


Figura 3.5. Distribución del diámetro máximo sobre muñón (DSM_m) en el ensayo de *Pinus radiata* situado en el monte de La Campa (izquierda, rojo) y el de *Pinus pinaster* ubicado en el monte de Valsera (derecha, azul).

Son diversas las recomendaciones sobre cuál es el valor más adecuado para el diámetro más grueso en el punto donde se insertan las ramas en la primera intervención de poda. Así, las revisiones realizadas por Dans del Valle *et al.* (1999) para *Pinus radiata* y por Rodríguez-Soalleiro *et al.* (1997) para *Pinus pinaster* señalan como diámetro sobre muñón recomendado valores comprendidos entre 8-10 cm. En el País Vasco, Chauchard y Olalde (2005; 2006), recomiendan realizar la primera intervención de poda para *Pinus radiata* cuando el tronco tenga 14 cm en el punto donde se insertan las ramas, intentando mantener ese diámetro para la siguiente intervención de poda. En Australia, de acuerdo con Private Forests Tasmania (2004) un diámetro sobre muñón óptimo para la poda de dicha conífera estaría comprendido entre 10 cm y 12 cm, no recomendando valores de DSM mayores a 15 cm en árboles menos vigorosos y de 25 cm en árboles dominantes. En Chile, Muñoz (1998) cifra para la primera intervención de poda de *Pinus radiata* un diámetro sobre muñón óptimo de aproximadamente 15 cm. En Nueva Zelanda, Park (1982) y Meyers (1995) señalan valores comprendidos entre 13 cm, y 19 cm como diámetro sobre muñón objetivo en esta especie. Para el caso de *Pinus pinaster*, las recomendaciones de poda descritas en Francia no consideran el valor del diámetro sobre muñón como variable de referencia de dicha intervención. Al margen de la

variabilidad que se puede encontrar en la bibliografía respecto al valor máximo aceptable de este diámetro, desde un punto de vista selvícola, en todos los casos se debe tomar como referencia que el máximo suponga como mucho un 33-40% del diámetro del árbol en la corta final (Bastien, 2005).

Atendiendo a los valores de DSM_m obtenidos en este estudio, y de acuerdo con los valores recomendados en la bibliografía, se podría considerar que los árboles de *Pinus pinaster* podados en este trabajo mostraban, en su mayoría, tamaños dentro de los valores considerados como adecuados. Sin embargo, en los ensayos de *Pinus radiata* hubo una mayor frecuencia de diámetros con grosores por encima de los recomendados para la maximización de la producción, con lo que cabría destacar nuevamente para esta especie que hubiera sido mejor haber intervenido con anterioridad. Además, resulta necesario considerar el engrosamiento del fuste sobre ese DSM_m , correspondiente con el proceso de oclusión de las heridas, siendo esperable por tanto un valor aun mayor para el tamaño del centro defectuoso formado a partir del DSM_m . Asimismo, de acuerdo con Park (1980; 1982; 1985), la propia sinuosidad del fuste será también determinante en el tamaño del centro con defectos, aunque la consideración de esta variable resulta poco frecuente por la mayor dificultad que implica su evaluación.

Por tanto, resulta de gran interés el conocimiento de los diferentes factores que pueden influir en el tamaño del DSM_m en el momento de la poda, de cara a adoptar las medidas necesarias para la minimización de su valor antes de la intervención y así obtener un menor tamaño del centro con defectos y por ende una mayor cantidad de madera libre de nudos. Por otra parte, y tal y como ya se ha comentado, los aspectos asociados a las ramas y al corte de las mismas van a resultar determinantes en la velocidad de cierre de las heridas y en el tamaño final del centro con defectos.

Otra variable relacionada con el DSM_m , y que adquiere gran importancia, es la altura del tronco a la que se encuentra este diámetro (h_{DSM_m}). En el presente estudio, el rango más frecuente para la primera poda se situó entre 1-1,5 m en *Pinus radiata*, con un valor medio de 1,1 m, y entre 0,8-1,3 m en *Pinus pinaster*, con un valor medio de 0,9 m (Figura 3.6). Tal y como se comentó para el análisis de la distribución del DSM_m , la h_{DSM_m} presentada se correspondió tan solo con una parcela de cada especie, siendo por ello necesario ampliar el rango de sitios evaluados para estudios posteriores.

En el modelo EARLY, utilizado en Nueva Zelanda para simular el crecimiento de *Pinus radiata* gestionado bajo una selvicultura intensiva (West *et al.*, 1982; 1987, cit. por Methol, 2002) se utiliza por defecto un valor de h_{DSM_m} de 0,8 m para la primera poda, siendo el rango normal de dicha altura entre 0,5 m y 1 m (Knowles *et al.*, 1987). Estos valores resultan más parecidos a los obtenidos para *Pinus pinaster* en el presente trabajo (0,5-1,25 m), siendo algo superior la altura de mayor

frecuencia observada en los ensayos de *Pinus radiata* (0,5-1,5 m). Por otra parte, Fassola *et al.* (2002a; 2004) observaron, para la primera intervención de poda de *Pinus taeda* en Argentina, que la mayoría de los árboles presentaban valores de h_{DSMm} por debajo de 1,30 m de altura, estando comprendido el valor promedio de esta variable entre 0,45-0,48 m. Asimismo, en dichos trabajos fue evaluada la h_{DSMm} para la poda alta, encontrando una buena relación de la misma con la altura de comienzo de la copa viva del árbol. De acuerdo con esto, además de conocer el valor de la h_{DSMm} para la primera intervención de poda resultará de gran interés poder cuantificar esta variable para la segunda fase experimental del trabajo, dada la importancia que puede tener el conocimiento de la ubicación del DSM_m para las diferentes intervenciones de este tratamiento selvícola.

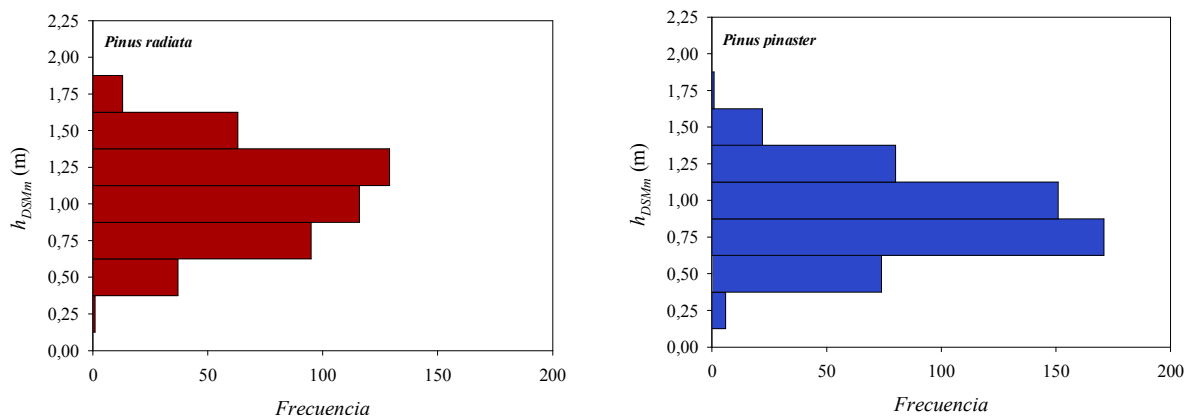


Figura 3.6. Distribución de la altura a la que se encuentra situado el diámetro máximo sobre muñón (h_{DSMm}) en los ensayos permanentes de *Pinus radiata* (izquierda, rojo) y *Pinus pinaster* (derecha, azul) situados en los montes de La Campa y Valsera, respectivamente.

En la Tabla 3.4 se muestran los valores de las variables DSM_f , DSM_m y h_{DSMm} determinados en las parcelas de ensayo situadas en los montes de La Campa (*Pinus radiata*) y Valsera (*Pinus pinaster*) en el momento inmediatamente posterior a la poda. Estos datos no han podido ser mostrados para el resto de los ensayos por haber sido realizada la medición de las variables DSM_m y h_{DSMm} tan solo en las dos parcelas comentadas.

Tabla 3.4. Valores medios y desviación estándar (entre paréntesis) de las variables DSM_f , DSM_m y h_{DSMm} , para las severidades de poda del 15%, 30% y 45%, en el inventario realizado inmediatamente después de la poda (invierno 2005-2006) en los ensayos permanentes de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* situados en los montes de La Campa y Valsera, respectivamente. Distintas letras indican diferencias significativas en el test de comparación de medias de Tukey ($\alpha = 95\%$).

Especie	Severidad poda	DSM_f	DSM_m	h_{DSMm}
<i>Pinus radiata</i>	15	15,58 (2,91) ^a	15,94 (2,81) ^a	0,76 (0,17) ^a
	30	14,37 (3,28) ^a	15,58 (3,48) ^a	1,09 (0,32) ^b
	45	12,83 (2,87) ^b	15,63 (3,64) ^a	1,16 (0,28) ^b

Tabla 3.4 (continuación). Valores medios y desviación estándar (entre paréntesis) de las variables DSM_f , DSM_m y h_{DSMm} , para las severidades de poda del 15%, 30% y 45%, en el inventario realizado inmediatamente después de la poda (invierno 2005-2006) en los ensayos permanentes de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* situados en los montes de La Campa y Valsera, respectivamente. Distintas letras indican diferencias significativas en el test de comparación de medias de Tukey ($\alpha=95\%$).

Especie	Severidad poda	DSM_f	DSM_m	h_{DSMm}
<i>Pinus pinaster</i>	15	11,38 (1,55) ^a	11,80 (1,59) ^a	0,78 (0,16) ^a
	30	9,75 (2,21) ^{ab}	10,78 (2,35) ^a	0,86 (0,25) ^a
	45	9,03 (2,20) ^b	10,77 (2,65) ^a	0,91 (0,27) ^a

donde DSM_f es el valor medio del diámetro sobre muñón en el último verticilo podado, en cm; DSM_m es el valor medio del diámetro sobre muñón en el verticilo podado de mayor grosor, en cm; h_{DSMm} es valor medio de la altura de ocurrencia del DSM_m , en m; y *Severidad poda* es la intensidad real de poda, en %.

Tal y como se ha ido viendo a lo largo de este capítulo, la aplicación de podas para obtener madera libre de nudos es una actividad que requiere de un control estricto para su optimización. Esto resulta realmente importante por la inversión que implica su realización, que tan sólo se justificará económicamente cuando sea realizada de forma correcta, debiendo ser analizado el resultado de la poda para todo el ciclo de producción (Park, 1994). Dentro del control que exige la realización adecuada de la poda, el aspecto más importante se basa en minimizar el tamaño del centro con defectos, cuyo valor va a depender, tal y como se ha indicado con anterioridad del diámetro máximo sobre muñón, de la oclusión de la herida de poda y de las sinuosidades de la médula (Park, 1980; 1982; 1985).

Uno de los aspectos más importantes para minimizar el valor del centro defectuoso, de acuerdo con lo comentado, es el control del tamaño del DSM_m . Para ello, resulta necesario realizar la medición *in situ* de este diámetro en el momento de la poda de cara a seleccionar el momento más óptimo para dicha intervención y los árboles más adecuados para ser intervenidos. Si bien esta tarea resulta fundamental para maximizar la cantidad de madera limpia a obtener al final del turno, el inventario necesario para cuantificar su valor requeriría de un mayor coste que un inventario forestal clásico. Por ello, y para facilitar la estimación del DSM_m han sido desarrolladas relaciones sencillas para la determinación de dicha variable a partir de otras variables dendrométricas, algunas de las cuales sí son consideradas habitualmente en un inventario forestal. De acuerdo con esto, fue efectuado un primer análisis de los datos para el mayor conocimiento del DSM_m y su relación con otras variables dendrométricas estimadas habitualmente en campo, así como los diámetros sobre muñón inicial y final (DSM_i y DSM_m , respectivamente) siendo realizado este análisis para cada conífera por separado.

En la Tabla 3.5 se recogen las relaciones que presentaron una mayor correlación entre los diferentes DSM_j evaluados y las principales variables dendrométricas

tomadas en campo para el inventario realizado tras la poda (invierno 2005-2006) en las parcelas de los montes de La Campa (*Pinus radiata*) y Valsera (*Pinus pinaster*).

Tabla 3.5. Matriz de correlación de las variables relacionadas con la calidad de la poda DSM_i , DSM_f y DSM_m , y las variables dendrométricas d y h , medidas en el momento inmediatamente posterior a la poda (invierno 2005-2006), en árboles podados de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* (DSM_m tan solo en los montes de La Campa y Valsera, respectivamente). El símbolo ** indica correlaciones significativas al nivel 0,01 (bilateral).

Especie	Variable	DSM_i	DSM_f	DSM_m	d	h
<i>Pinus radiata</i>	DSM_i	1	0,872 **	0,945 **	0,952 **	0,709 **
	DSM_f		1	0,822 **	0,859 **	0,605 **
	DSM_m			1	0,936 **	0,702 **
	d				1	0,764 **
	h					1
<i>Pinus pinaster</i>	DSM_i	1	0,924 **	0,972 **	0,950 **	0,643 **
	DSM_f		1	0,912 **	0,913 **	0,646 **
	DSM_m			1	0,950 **	0,676 **
	d				1	0,809 **
	h					1

donde DSM_i es el diámetro sobre muñón en el primer verticilo podado, en cm; DSM_f es el diámetro sobre muñón en el último verticilo podado, en cm; DSM_m es el diámetro sobre muñón en el verticilo podado de mayor grosor, en cm; d es el diámetro normal, en cm; y h es la altura total, en m.

De acuerdo con los resultados presentados en la Tabla 3.5, los DSM_j considerados en este trabajo (DSM_i , DSM_f y DSM_m) mostraron mejor relación con el diámetro normal (d) que con la altura total (h) para ambas especies. Aunque en España en muchos casos se utiliza la altura total del árbol como indicador para el momento en que se debe realizar la poda, de acuerdo con los datos obtenidos en este trabajo el diámetro normal sería una variable mucho más fiable para la estimación del momento óptimo de poda. Así, los valores obtenidos para el DSM_m , como diámetro determinante del tamaño del centro defectuoso y la formación de madera limpia, muestran que el diámetro normal permite explicar una mayor variación del DSM_m (95% para *Pinus pinaster* y 94% para *Pinus radiata*) que la altura total (68% para *Pinus pinaster* y 70% para *Pinus radiata*).

En cuanto al diámetro del árbol en el último verticilo podado (DSM_f), los resultados obtenidos en el análisis de correlación realizado en este trabajo mostraron que el DSM_f también puede ser un buen indicador del momento óptimo de poda dada su buena relación con el DSM_m . Comparativamente, la variación del DSM_f mostró estar más altamente relacionada con el DSM_m para *Pinus pinaster* que para *Pinus radiata*. Asimismo, el DSM_f presentó también una buena asociación con el diámetro

normal del árbol. Las buenas correlaciones obtenidas para el DSM_m y el DSM_i se deben a la coincidencia, en muchos de los árboles, de estos diámetros.

La estrecha relación existente entre las variables d y DSM_m ha sido observada ya en diversos trabajos previos. Ejemplo de ello son los estudios de Fassola y Gelid de Ruibal (1997) para *Pinus taeda*, y Romano (2002) para *Pinus radiata*. Por ello, resulta habitual emplear el d en el ajuste de funciones que ayuden a predecir el valor del DSM_m . Otras variables utilizadas en este tipo de modelos han sido la altura total, el diámetro de la rama de mayor tamaño en el verticilo correspondiente con el DSM_m y variables que definen el perfil del fuste (p.e. Fassola *et al.*, 2002a; 2004). De todas ellas, los mejores resultados en el presente estudio fueron obtenidos al considerar el d como variable explicativa del modelo.

Las expresiones finales de las funciones seleccionadas en este trabajo para cada especie se muestran en la Tabla 3.7, estando recogidos en la Tabla 3.6 los parámetros estimados tras el ajuste de las ecuaciones.

Tabla 3.6. Parámetros estimados y estadísticos de bondad del ajuste de las ecuaciones definidas para la estimación del DSM_m en función del d en el momento inmediatamente posterior a la poda, para *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* (montes de La Campa y Valsera, respectivamente).

Especie	Parámetro	Estimación	Error estándar asintótico	t Valor	Prob> t	REMC	R^2_{adj}
<i>Pinus radiata</i>	a_0	1,6327	0,2434	6,71	<0,0001	1,2199	0,8759
	b_0	1,1807	0,0200	59,11	<0,0001		
<i>Pinus pinaster</i>	a_1	1,9477	0,1378	14,13	<0,0001	0,8007	0,9020
	b_1	1,0517	0,0158	66,60	<0,0001		

donde Prob>|t| es el valor de significación de cada parámetro estimado; REMC es la raíz cuadrada del error medio cuadrático; R^2_{adj} es el coeficiente de determinación ajustado; y a_i y b_i son los parámetros estimados en los modelos.

Tabla 3.7. Modelos de predicción del DSM_m en el momento inmediatamente posterior a la poda, para *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* (montes de La Campa y Valsera, respectivamente).

Especie	Modelo
<i>Pinus radiata</i>	$DSM_m = 1,6327 + 1,1807 \cdot d$ (4.1)
<i>Pinus pinaster</i>	$DSM_m = 1,9477 + 1,0517 \cdot d$ (4.2)

donde DSM_m es el diámetro sobre muñón en el verticilo podado de mayor valor, en cm; y d es el diámetro normal del árbol, en cm.

En la Figura 3.7 se muestran, para cada especie, los gráficos de los valores estimados por estos modelos frente a los valores observados en campo. Se observa una buena precisión en las estimaciones, siendo algo inferior la precisión para los valores de DSM_m que exceden de los 20 cm para *Pinus radiata*.

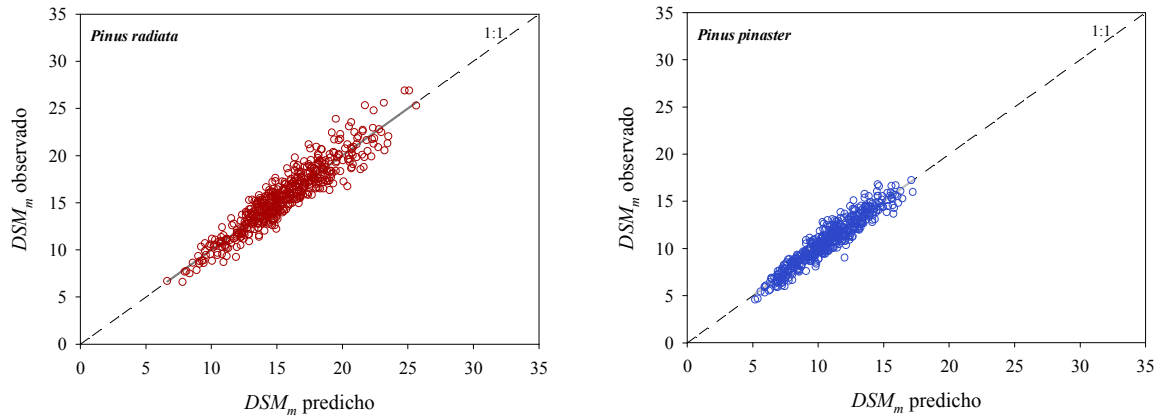


Figura 3.7. Gráfico de valores observados frente a valores predichos para los modelos de estimación del DSM_m definidos para *Pinus radiata* (izquierda, rojo) y *Pinus pinaster* (derecha, azul) (montes de La Campa y Valsera, respectivamente).

Es importante destacar también que resultará necesario considerar en un futuro otras características físicas del árbol como la ramosidad, la rectitud del fuste, la clase sociológica o el estado sanitario, para un mayor rango de sitios de estudio y situaciones del rodal. Asimismo, se deberán tener en cuenta diversas características del árbol y de la poda, especialmente el número de intervenciones (en este caso, primera y segunda poda). Todos estos factores, en su conjunto, permitirán al gestor centrar la aplicación de la poda tan sólo en los mejores árboles, que van a devolverle al final del turno la inversión realizada con la operación. Se debe apuntar por tanto que las funciones aquí presentadas deberán ser mejoradas en estudios posteriores, dado que en esta parte del trabajo tan sólo han podido ser ajustadas ecuaciones para datos de un sitio de ensayo de cada especie y una primera intervención de poda.

3.3.2. Formación del centro con defectos

Los diámetros sobre muñón evaluados en las ocho parcelas permanentes de ensayo, para los diferentes inventarios realizados, mostraron de nuevo una buena relación con las variables dendrométricas d y h para todos los diámetros sobre muñón analizados a diferentes alturas del fuste, DSM_j (DSM_i , DSM_f y DSM_m). Teniendo en cuenta este resultado, y dado que tan solo habían sido evaluados los diferentes DSM_j en el total de los ensayos permanentes durante el invierno 2008-2009 (inventario realizado tres años después de la poda), se recogen en la Tabla 3.8 las relaciones obtenidas en ese momento para cada variable en el conjunto de parcelas de cada una de las especies estudiadas.

Tabla 3.8. Matriz de correlación de las variables relacionadas con la poda DSM_i , DSM_f y DSM_m y las variables dendrométricas d y h , medidas tres años después de la intervención (invierno 2008-2009), en los árboles podados de las parcelas permanentes de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* estudiadas. El símbolo ** indica correlaciones significativas al nivel 0,01 (bilateral).

Especie	Variable	DSM_i	DSM_f	DSM_m	d	h
<i>Pinus radiata</i>	DSM_i	1	0,924 **	0,991 **	0,965 **	0,674 **
	DSM_f		1	0,929 **	0,917 **	0,614 **
	DSM_m			1	0,965 **	0,668 **
	d				1	0,710 **
	h					1
<i>Pinus pinaster</i>	DSM_i	1	0,936 **	0,998 **	0,946 **	0,647 **
	DSM_f		1	0,938 **	0,918 **	0,602 **
	DSM_m			1	0,947 **	0,647 **
	d				1	0,724 **
	h					1

donde DSM_i es el diámetro sobre muñón en el primer verticilo podado, en cm; DSM_f es el diámetro sobre muñón en el último verticilo podado, en cm; DSM_m es el diámetro sobre muñón en el verticilo podado de mayor grosor, en cm; d es el diámetro normal, en cm; y h es la altura total, en m.

Otra de las relaciones observada en este trabajo, y que ha sido reportada igualmente por otros autores, es la existente entre los diferentes diámetros sobre muñón para los años sucesivos a la poda, siendo la más importante de todas ellas la relación existente entre el diámetro sobre oclusión (DSO) y el diámetro máximo sobre muñón (DSM_m), por ser la más destacada para la caracterización de la calidad de la madera producida.

La determinación del DSM_m resulta relativamente fácil en el momento de la poda mientras que la definición del DSO resulta bastante más costosa, dada la necesidad de conocer el momento exacto de cierre de las diferentes heridas generadas en la poda, debiendo evaluar especialmente las de mayor tamaño y las situadas en el DSM_m , e incluso la sinuosidad del fuste. Además, aspectos como la velocidad de cierre de las heridas estarán condicionados también por otros factores internos y externos, que, de forma conjunta, influirán en la calidad de la operación y en el comienzo de formación de madera limpia, dificultando así la correcta determinación del DSO .

Para este trabajo, la cicatrización de las heridas tan solo pudo ser evaluada en una de las parcelas de ensayo de *Pinus radiata* (situada en el monte de La Campa), en la que únicamente fueron medidas las cuatro heridas de poda de mayor tamaño, seleccionadas para la estimación del BIX , cuyos resultados se muestran en el siguiente apartado. Por otra parte, tampoco ha sido evaluada la rectitud de cada árbol

para su relación con el DSO y la calidad de la madera, siendo la existencia de curvatura y su posición en el tronco factores determinantes en la calidad de la poda y del producto final (la presencia de sinuosidad en el tronco va a generar un centro con defectos de mayor tamaño y consecuentemente una menor cantidad de madera libre de nudos). En este aspecto, se debe aclarar que dentro de la gestión selvícola enfocada a la obtención de madera de calidad, la influencia de factores internos como la sinuosidad del fuste es difícilmente controlable. Sin embargo, variables externas como el momento e intensidad de la poda, el tipo de árboles a podar, la calidad del sitio o la herramienta y técnica de corte de las ramas son factores que aplicados de forma adecuada permiten garantizar un mayor valor de la producción al final del turno.

Por todo ello, será necesario considerar en estudios posteriores todos estos factores para la correcta caracterización del DSO y la selección de los mejores árboles sobre los que llevar a cabo la poda alta, que tendrá lugar durante la segunda fase experimental de los ensayos. Asumiendo la necesidad de un estudio posterior, para ambas especies, se muestra a continuación la relación existente entre los diferentes valores del DSM_m (DSO de mayor tamaño en algunos casos en que se haya producido el cierre completo de las heridas de poda), correspondientes con los inventarios realizados en el momento posterior a la poda (invierno 2005-2006) y tres y cuatro años después de la intervención (inviernos 2008-2009 y 2009-2010) para las parcelas situadas en los montes de La Campa (*Pinus radiata*) y Valsera (*Pinus pinaster*) (Figura 3.8).

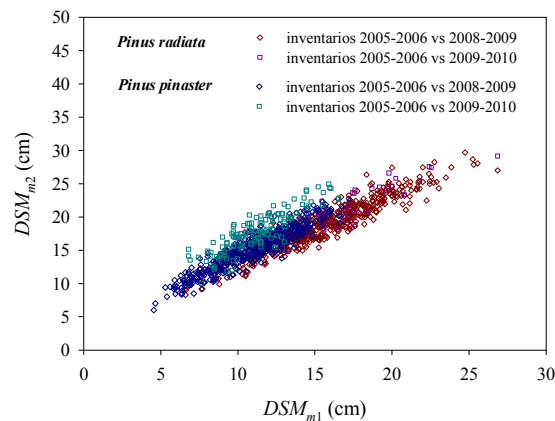


Figura 3.8. Diámetro máximo sobre muñón (DSM_m) en el momento inmediatamente posterior a la poda (DSM_{m1} , invierno 2005-2006), en relación con el DSM_m tres y cuatro años después de la intervención (DSM_{m2} , inviernos 2008-2009 y 2009-2010, respectivamente), para la parcela de ensayo de *Pinus radiata* (símbolos en tonos rojos) situada en el monte de La Campa y de *Pinus pinaster* (símbolos en tonos azules) ubicada en el monte de Valsera.

De acuerdo con la Figura 3.8, se confirma la buena relación existente entre las sucesivas mediciones del DSM_m , confirmando así la posibilidad de determinar el tamaño del DSO a partir de la medición del DSM_m en el momento de la poda y el

correcto seguimiento del cierre de las heridas y de la sinuosidad del fuste. Por todo ello, un estudio más detallado de este tipo de ensayos, permitirá establecer la relación existente entre el diámetro máximo sobre muñón (DSM_m) y el centro con defectos (DSO) de una forma más precisa. Este tipo de trabajo resulta necesario para la maximización de la producción obtenida en las masas de las principales especies productoras del norte peninsular como son *Pinus radiata* y *Pinus pinaster*.

La evaluación temporal de parámetros en las parcelas de ensayo seleccionadas (La Campa para *Pinus radiata* y Valsera para *Pinus pinaster*), permite observar que los diferentes diámetros sobre muñón evaluados, DSM_j (DSM_i , DSM_f y DSM_m), y la covariable DSM_j en el momento inicial, mostraron diferencias significativas para las dos especies estudiadas ($p < 0,0001$), con un mayor incremento diametral para *Pinus pinaster* (promedio de 1,35 cm/año) que para *Pinus radiata* (promedio de 1,12 cm/año). Este mayor crecimiento de la zona que contiene las ramas podadas, facilitaría *a priori* el proceso de oclusión de las heridas de poda, siendo necesario señalar que, tal y como se verá en el siguiente apartado, dicho proceso va a depender a su vez de muchos otros factores que también deben ser considerados (tamaño de la herida de poda, intensidad de poda, etc.). De acuerdo con estas diferencias para cada especie, el crecimiento corriente en diámetro sobre muñón (ic_DSM_j) fue evaluado por separado para cada una de las coníferas estudiadas. El análisis de varianza realizado dio como resultado diferencias significativas para el sitio de ensayo ($p < 0,0001$) en ambas especies, mostrando diferencias estadísticas significativas también para el factor severidad de poda en la especie *Pinus radiata* ($p < 0,0001$) pero no para *Pinus pinaster* ($p = 0,1083$). La interacción entre los factores sitio de ensayo y severidad de poda no fue significativa en ninguna de las coníferas. Por otra parte, los crecimientos obtenidos para cada DSM_j no mostraron diferencias estadísticamente significativas, lo que indicó crecimientos similares para los diámetros sobre muñón considerados, ic_DSM_j (ic_DSM_i , ic_DSM_f e ic_DSM_m), independientemente de la altura a la que se encontraran. La Figura 3.9 muestra el valor promedio de ic_DSM_j en el período evaluado. En todos ellos, los crecimientos tendieron a ser inferiores a mayor severidad de poda, siendo únicamente significativa la reducción del crecimiento para el tratamiento de poda del 45% en *Pinus radiata*. Este resultado indicaría nuevamente una mejor respuesta a la poda en *Pinus pinaster*, haciendo poco recomendable la poda de severidad 45% en *Pinus radiata* por la presencia de ramas de mayor diámetro y el menor incremento corriente en DSM_j que ralentizarían el cierre de las heridas.

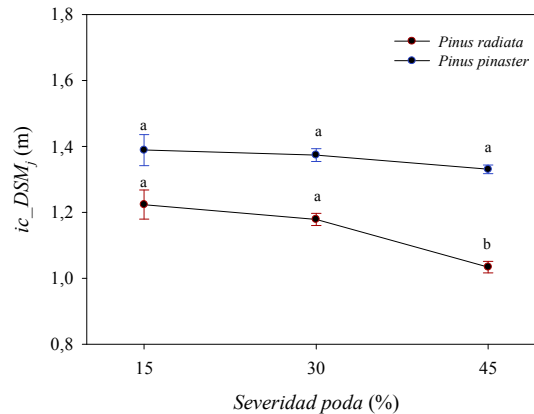


Figura 3.9. Crecimiento corriente medio de los diámetros sobre muñón evaluados, ic_DSM_j (ic_DSM_i , ic_DSM_f , ic_DSM_m), en función de la severidad de poda (agrupada en 15%, 30% y 45%) y la especie (*Pinus radiata*, en rojo; y *Pinus pinaster*, en azul). Letras diferentes indican distintos grupos en el test de comparación de Tukey ($\alpha = 95\%$).

Trabajos como el de Pinkard y Beadle (1998b) para *Eucalyptus nitens* H. (Deane & Maiden) Maiden, mostraron diferencias en los incrementos en diámetro para distintas alturas del fuste e intensidades de poda. Sin embargo, dichos autores, tal y como se discute con más detalle en el capítulo 4, evaluaron el comportamiento del diámetro del tronco medido en zonas libres de defectos, sin considerar los posibles engrosamientos del fuste. En nuestro trabajo, sin embargo, fueron consideradas las zonas del fuste con defectos, correspondientes con los verticilos podados, lo que podría explicar el diferente comportamiento observado en ambos estudios. En cualquier caso, dada la ausencia de trabajos de esta naturaleza para las especies y ámbito geográfico empleados en esta tesis, los resultados mostrados permiten aportar información preliminar sobre la evolución del centro con defectos para diferentes intensidades de poda en ambas coníferas. Asimismo, se espera poder obtener resultados de gran interés a medio plazo, tras la evaluación conjunta de las podas y las claras, y la consideración de un mayor rango de verticilos en el fuste, pudiendo definir así de forma más precisa el centro con defectos.

3.3.3. Cicatrización de las heridas de poda

En el ensayo de *Pinus radiata* ubicado en el monte de La Campa, pudo observarse de forma genérica el procedimiento de cicatrización de las cuatro heridas de poda de mayor tamaño seleccionadas para la estimación del índice de ramosidad *BIX*. En esta parte del trabajo fue analizada la cicatrización de las heridas desde el momento de la poda (invierno 2005-2006), con un seguimiento de las mismas dos y tres años después de la intervención (inviernos 2007-2008 y 2008-2009).

En un primer análisis sobre la oclusión de las heridas, en función del tamaño de las mismas, se hizo notable el menor tiempo requerido para el cierre de aquellas heridas que presentaban un menor tamaño tras la poda, independientemente de la

intensidad del tratamiento o del grosor del árbol podado (Figura 3.10, izquierda). Así, tres años después de la intervención, se observó el cierre del 100% de las heridas con diámetros inferiores a 1 cm, el 74% de las heridas de 1-2 cm, el 50% de las heridas de 2-3 cm y cerca del 30% de las heridas de 3-5 cm. De todas ellas, ninguna herida mayor de 4cm había cicatrizado dos años después de la poda, siendo observada la oclusión completa de tan solo el 4% de las heridas de 2-3 cm y el 1% de las heridas de 3-4cm para dicho período de tiempo.

Todos los árboles que mostraron el cierre completo de sus cuatro heridas de mayor tamaño en el inventario realizado dos años después de la poda tenían valores medios del diámetro de la herida inferiores a 2 cm. Para el inventario siguiente, realizado tres años después de la intervención, el 86% de los árboles que mostraron sus cuatro heridas de mayor tamaño cerradas tenían heridas de poda con diámetros inferiores a 3 cm. Para heridas superiores, tan solo cicatrizaron el 13% de los árboles cuyo valor medio de herida de poda era de 3,8 cm de diámetro, y apenas el 1% de los árboles en los que la herida tenía un diámetro medio de 4,5 cm. Por tanto, y considerando tan solo el diámetro de las heridas en el momento de la intervención, diámetros de hasta 2 cm serían los más adecuados para asegurar un menor tiempo de oclusión, pudiendo podar ramas que causaran heridas de hasta 3cm siempre que sea realizado un corte adecuado de las mismas. Diámetros superiores supondrían un retraso importante en el cierre completo de las heridas y, por consiguiente, en la formación de madera limpia. Esto puede ser respaldado también por el hecho de que el tamaño medio de las heridas ocluidas en el tiempo evaluado había sido inferior a 3 cm (promedio de 1,6 cm para el inventario de 2007-2008 y de 2,6 cm para el inventario de 2008-2009).

Por otra parte, el análisis del cierre de las heridas, considerando el tratamiento de poda efectuado, mostró un menor porcentaje de cicatrización a mayor severidad de poda (Figura 3.10, derecha). El tamaño medio de las heridas evaluadas para cada intensidad de poda también presentó diferencias, con menores valores medios de los diámetros de las heridas para la intensidad más débil (15%) y mayores valores para la más fuerte (45%). Esto podría estar condicionando los resultados anteriormente mencionados, con un menor porcentaje de cicatrización a mayor severidad de poda, tratamiento para el que además las heridas de poda presentaron mayor superficie a cicatrizar. Así, por una parte, las heridas ocluidas en el inventario realizado dos años después de la poda presentaban un diámetro medio en el momento de la intervención de 1,3 cm para la severidad del 15%, de 1,7 cm para la poda del 30% y de 1,8 cm para el tratamiento del 45%. Por otra parte, las heridas que mostraron su oclusión en el siguiente inventario presentaban en el momento de la poda un diámetro medio de 1,8 cm para la poda del 15%, de 2,6 cm para la intervención del 30% y de 2,9 cm para la del 45%. En ambos inventarios, efectuados dos y tres años después de la

intervención, el valor medio de las heridas cicatrizadas en dicho período de tiempo fue, en todos los casos, inferior a 3 cm.

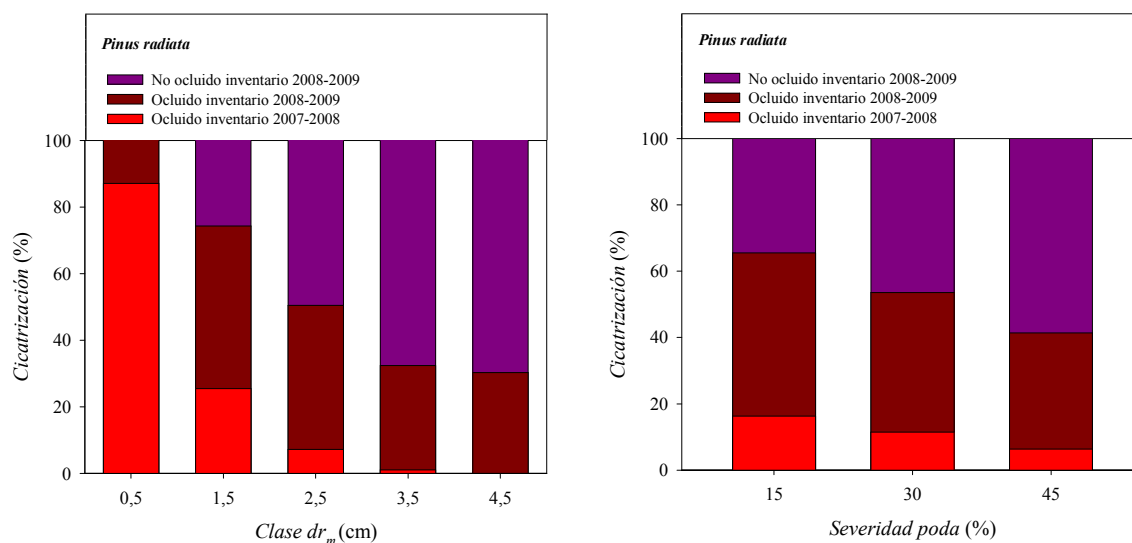


Figura 3.10. Porcentaje medio de heridas de poda cicatrizadas dos y tres años después de la intervención (inviernos 2007-2008 y 2008-2009, respectivamente), en función de la clase diamétrica de la herida de poda ($Clase\ dr_m$) (izquierda) y de la severidad del tratamiento (derecha), en un rodal podado de *Pinus radiata* (monte de La Campa).

Considerando los árboles podados para cada severidad de poda, tan solo un 16% y 11% de los pies pertenecientes a los tratamientos del 15% y 30% de poda, respectivamente, habían mostrado todas sus heridas cicatrizadas a los dos años de la intervención, siendo el 49% y 42% de los árboles de esos tratamientos los que habían cerrado sus heridas una año más tarde. Para la poda del 45% estos porcentajes fueron algo inferiores, encontrando tan solo un 6% de los árboles con el cierre de sus heridas a los dos años de la poda y un 35 % de los pies cuyas heridas habían ocluido tres años después de la intervención. Los árboles que no consiguieron cerrar las cuatro heridas evaluadas en el período de estudio tuvieron, en todos los casos, diámetros medios de las heridas superiores a 3 cm. Por todo lo anterior, cabría recomendar nuevamente la poda de ramas que generen heridas con tamaños preferiblemente inferiores a 3 cm, para garantizar un menor tiempo de oclusión de las mismas. En cualquier caso, y como ya se ha ido comentando, esta precaución tan solo sería efectiva si se realiza un corte adecuado de las ramas que facilite el proceso de cicatrización, y se tienen en cuenta otros aspectos determinantes en dicho proceso (p.e. buen crecimiento del árbol y buena calidad de estación).

En cuanto al grosor del árbol en el momento de la intervención, se pudo observar también cierta relación con el tamaño de las heridas de poda y el cierre de las mismas. Así, tal y como se observa en la Figura 3.11, a mayor grosor del árbol el diámetro medio de las heridas podadas evaluadas fue mayor, con valores medios superiores a los 3cm para los árboles de clases diamétricas por encima de 12-14 cm.

De acuerdo con esto, y dado que el diámetro sobre muñón será aún mayor que el diámetro normal, se podría recomendar la poda de aquellos pies cuyos diámetros normales no excedan esos 12-14 cm en el momento de la intervención, siendo esperable así una cicatrización de las heridas en un tiempo más razonable, con la consiguiente optimización de la poda para la mayor producción de madera de calidad.

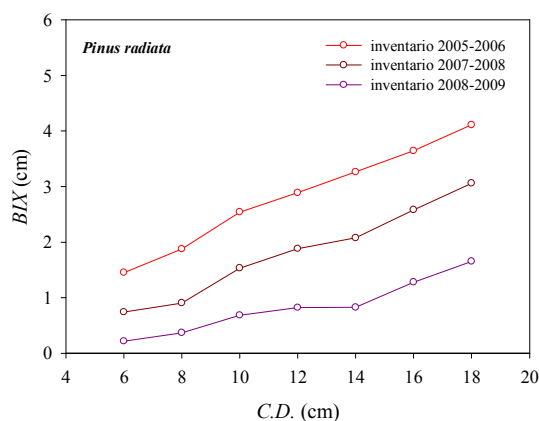


Figura 3.11. Diámetro medio de las cuatro heridas de mayor tamaño, una de cada cuadrante (*BIX*), en función de las clases diamétricas representativas de los árboles podados (*C.D.*) en el momento posterior a la intervención (invierno 2005-2006), y dos y tres años después de los tratamientos (inviernos 2007-2008 y 2008-2009) en un rodal podado de *Pinus radiata* (monte de La Campa).

El porcentaje de heridas cerradas fue de aproximadamente un 40% para los árboles de menor tamaño diamétrico (clases diamétricas de 6 cm y 8 cm), siendo también sus heridas de poda de menor grosor. Las clases diamétricas por encima de 8 cm mostraron un menor porcentaje de heridas cicatrizadas, con un 22% aproximadamente para la clase diamétrica de 10 cm, y cercanas al 10% para los árboles con diámetros normales dentro de las clases diamétricas 12-16 cm. El total de heridas cerradas en el último inventario realizado fue algo superior, con un 75% para las clases diamétricas 6-8 cm, en torno a un 50% para las clases diamétricas 10-14 cm, y una menor representación para las siguientes clases diamétricas (40% y 30% de oclusión para las clases diamétricas 16 cm y 18 cm, respectivamente) (Figura 3.12). Atendiendo a estos valores, podría recomendarse la poda de árboles pertenecientes a las clases diamétricas comprendidas entre 8 cm y 12 cm. Sin embargo, resulta necesario analizar conjuntamente el crecimiento posterior del árbol, ya que la eliminación de una parte importante de la copa en pies de pequeño diámetro podría suponer una pérdida importante de crecimiento y, por ende, de la producción.

El 94% de los árboles que cerraron por completo las cuatro heridas evaluadas a los dos años de la poda pertenecían a las clases diamétricas comprendidas entre 8-14 cm, no observando ningún árbol con clase diamétrica mayor a 14 cm que lograra

cicatrizar todas sus heridas en ese intervalo de tiempo. El inventario realizado tres años después de la intervención mostró árboles de todas las clases diamétricas con sus cuatro heridas ocluidas, con mayor porcentaje de árboles cicatrizados para las menores clases diamétricas. Así, en todo el tiempo de estudio, el cierre completo de las heridas tuvo lugar en el aproximadamente el 75% de los árboles podados hasta la clase diamétrica de 8 cm, el 56% de los pies podados con clase diamétrica de 10 cm, el 50% de los árboles de clase diamétrica 12-14 cm, el 40% de los pies de clase diamétrica de 16 cm y el 29% de los árboles podados con clase diamétrica 18 cm.

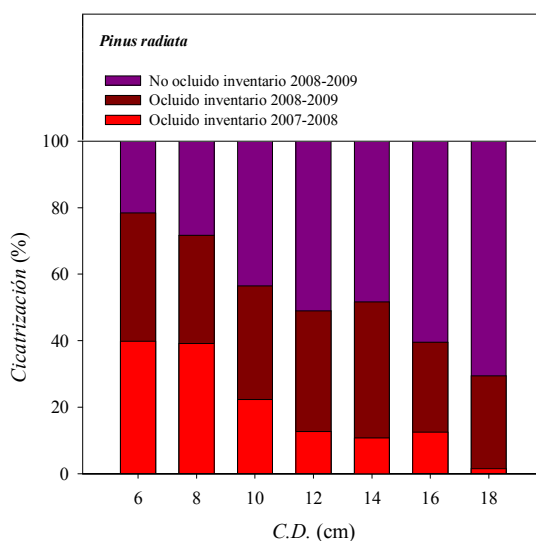


Figura 3.12. Porcentaje de heridas ocluidas en función de la clase diamétrica del árbol (C.D.) en el momento inmediatamente posterior a la poda (invierno 2005-2006), dos y tres años después de la intervención (inviernos 2007-2008 y 2008-2009, respectivamente) en un rodal podado de *Pinus radiata* (monte de La Campa).

Un análisis de las heridas ocluidas diferenciando las cuatro secciones establecidas en cada fuste podado para la estimación del índice *BIX*, mostró el mayor porcentaje de oclusión para el cuadrante IV (dirección norte) y el menor porcentaje de oclusión para el cuadrante II (dirección sur), con valores muy similares para los cuadrantes I y III (direcciones este y oeste, respectivamente). Estos resultados fueron observados en los dos inventarios realizados (Figura 3.13). De acuerdo con esto, teniendo en cuenta la orientación de dichos cuadrantes, la oclusión de las heridas podadas se produciría con anterioridad en la cara norte del fuste, siendo menor la velocidad de cierre de las heridas situadas en la cara sur. Este resultado, podría ser debido, en parte, a la diferencia observada para el tamaño medio de las heridas de cada cuadrante, con menores diámetros en el cuadrante IV, correspondiente con la cara norte (2,6 cm), y mayores diámetros para el cuadrante II, ubicado en la cara sur (3,1 cm). Los otros dos cuadrantes del fuste (I y III, caras este y oeste, respectivamente) presentaron valores intermedios de las heridas de poda (2,7 cm y 2,9 cm, respectivamente).

Algunos trabajos previos han evaluado la distribución de las ramas, considerando su diámetro y frecuencia a lo largo del fuste, siendo en muchos casos resultados que dependen de aspectos como la especie y el área de estudio. Así, por ejemplo, Achim *et al.* (2006) trabajando con *Picea sitchensis* en el Reino Unido, observaron diámetros mayores en las caras sur y suroeste del fuste, con un mayor número de ramas en la parte norte del tronco. Lemieux *et al.* (1997), por su parte, indicaron un mayor volumen nudoso en la parte sur y sureste de los árboles para *Picea abies* (L.) Karsten en Finlandia, relacionando dicho resultado con la mayor frecuencia de ramas y el mayor tamaño de las mismas en dicha parte del fuste. Estas diferencias en los resultados, de acuerdo con Grace *et al.* (1999), podrían estar asociadas con los diferentes factores que van a intervenir en la producción de ramas y su correspondiente crecimiento (p.e. pendiente, orientación y densidad de la masa).

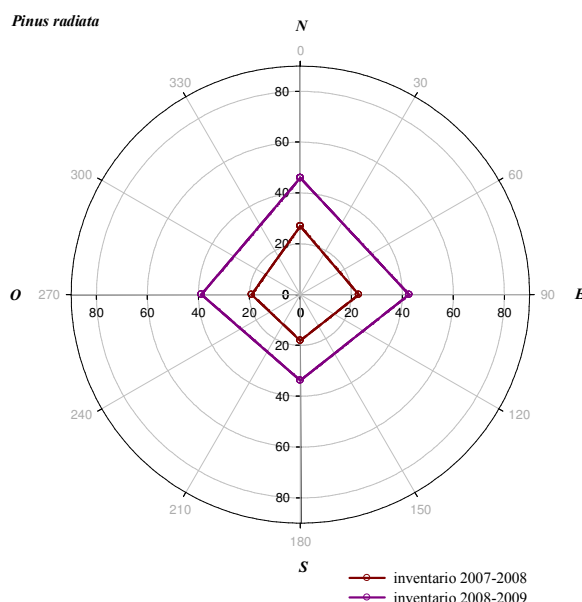


Figura 3.13. Porcentaje medio de heridas de poda cicatrizadas dos y tres años después de la intervención (inventarios 2007-2008 y 2008-2009, respectivamente), en función del cuadrante del fuste en que se encontraba situada la rama eliminada, para un rodal podado de *Pinus radiata* (monte de La Campa).

La influencia de algunos de los aspectos comentados en el proceso de cicatrización fue observada nuevamente tras el análisis de la velocidad de cierre de las heridas (o_dr_m). Para ello, fue realizado un análisis de correlación entre la velocidad de cierre de las mismas, para todo el período de estudio, y otras variables relacionadas con las heridas de poda (dr_m , h_{drm}) y el tamaño del árbol en el momento de la intervención (d , h , h_{base}), mostrando en la Tabla 3.9 las principales relaciones encontradas.

De acuerdo con esta tabla, la velocidad de oclusión de las heridas (o_dr_m) muestra una relación positiva con todas las variables mostradas, siendo esperable que árboles de mayor tamaño faciliten el cierre de las heridas. Sin embargo, y como ya se ha

expuesto anteriormente, los árboles de mayor tamaño muestran a su vez heridas de mayor diámetro, de manera que a pesar de la mayor velocidad de cierre en esos árboles, el tiempo de oclusión requerido por las heridas será superior al de las ramas de pies menos gruesos que presenten heridas de menor tamaño.

Tabla 3.9. Matriz de correlación de variables relacionadas con la cicatrización de las heridas de poda y otras variables dendrométricas sencillas medidas en el momento inmediatamente posterior a la poda (invierno 2005-2006) en árboles podados de *Pinus radiata* pertenecientes al ensayo situado en el monte de La Campa. El símbolo ** indica correlaciones significativas al nivel 0,01 (bilateral).

Variable	o_dr_m	dr_m	h_{drm}	d	h
o_dr_m	1	0,564 **	0,332 **	0,315 **	0,293 **
dr_m		1	0,416 **	0,536 **	0,422 **
h_{drm}			1	0,254 **	0,363 **
d				1	0,777 **
h					1

donde o_dr_m se corresponde con la velocidad de oclusión de las heridas de poda en el período evaluado (invierno 2005-2006 a invierno 2008-2009), en cm/año; dr_m es el diámetro medio de la herida de poda tras la intervención, en cm; h_{drm} es la altura a la que se encuentra la herida de poda, en m; d es el diámetro normal en el momento de la poda, en cm; y h es la altura total en el momento de la poda, en m.

Un aspecto que no ha sido comentado hasta el momento, y que también puede ser observado en la tabla anterior es la influencia de la localización de las heridas (h_{drm}), con una relación positiva entre la velocidad de oclusión y la altura a la que se encuentra la herida en el fuste. Esto podría ser debido a la mayor cercanía de la rama eliminada a la copa, como zona principal de producción de carbohidratos y de crecimiento.

Por otra parte, ha sido realizado un análisis de correlación para la velocidad de cierre de las heridas (o_dr_m) y el incremento anual en diámetro normal (ic_d), en diámetro sobre muñón, para los diferentes verticilos evaluados (ic_DSM_j), e incremento en altura (ic_h). Asimismo, fueron incluidos en el análisis algunos índices de competencia independientes de la distancia, encontrando las mejores relaciones para los índices Rd_g , Rd_m y RD_0 (Tabla 3.10).

A pesar de que las relaciones encontradas con la velocidad de cierre no resultaron ser muy altas, todas ellas fueron positivas y significativas (Tabla 3.10). De todas, la mejor correlación fue obtenida para el crecimiento corriente en diámetro sobre muñón, seguido del crecimiento corriente en diámetro normal y en altura. Para las variables de masa consideradas (área basimétrica, densidad, altura y diámetro dominantes, altura media y diámetro medio, diámetro medio cuadrático, etc.), las relaciones obtenidas fueron muy débiles mientras que las correlaciones con los índices de competencia evaluados fueron algo mejores. En este último caso, el hecho

de que a mayores valores de los índices Rd_g , Rd_m y RD_0 se mostrara mayor velocidad de oclusión significaría que los árboles con mayor dominancia presentarían un ritmo de cicatrización mayor.

Tabla 3.10. Matriz de correlación de la velocidad de cierre de las heridas de poda y los incrementos anuales en diámetro normal, altura total y diámetro sobre muñón del árbol, así como algunos índices de competencia independientes de la distancia, para todo el período de estudio, en árboles podados de *Pinus radiata* pertenecientes al ensayo situado en el monte de La Campa. El símbolo ** indica correlaciones significativas al nivel 0,01 (bilateral).

Variable	o_dr_m	ic_d	ic_h	ic_DSM_j	Rd_g	Rd_m	RD_0
o_dr_m	1	0,364 **	0,178 **	0,345 **	0,327 **	0,325 **	0,325 **
ic_d		1	0,289 **	0,422 **	0,378 **	0,380 **	0,376 **
ic_h			1	0,312 **	0,230 **	0,230 **	0,226 **
ic_DSM_j				1	0,302 **	0,305 **	0,303 **
Rd_g					1	0,999 **	0,979 **
Rd_m						1	0,972 **
RD_0							1

donde o_dr_m se corresponde con la velocidad de oclusión de las heridas de poda, en el período evaluado (invierno 2005-2006 a invierno 2008-2009), en cm/año; ic_d es el crecimiento corriente en diámetro, en cm/año; ic_h es el crecimiento corriente en altura, en m/año; ic_DSM_j es el crecimiento corriente en diámetro sobre muñón para los diferentes verticilos evaluados (primero, último y máximo), Rd_g es la razón del diámetro normal del árbol con el diámetro medio cuadrático del rodal (d_g); Rd_m es la razón del diámetro normal del árbol (d) con el diámetro medio del rodal (d_m); y RD_0 es la razón del diámetro normal del árbol (d) con el diámetro dominante del rodal (D_0).

Un análisis más detallado, para una misma escala temporal, mostró valores de crecimiento en grosor del árbol superiores a la velocidad de oclusión de las heridas. Esto puede ser observado en la Tabla 3.11, en la que se muestran los valores medios de crecimiento en diámetro (ic_d) y en diámetro sobre muñón (ic_DSM_j), así como la velocidad de cierre de las heridas (o_dr_m), diferenciando los árboles por el número heridas ocluidas (considerando únicamente las cuatro heridas de mayor tamaño señaladas) al final del período de estudio. Se presentan también los valores medios de diámetro normal (d) y de diámetro máximo sobre muñón (DSM_m).

De acuerdo con los resultados mostrados en la Tabla 3.11, podría recomendarse que la primera poda sea realizada en árboles que no superen los 12 cm de grosor, en los que preferiblemente el DSM_m no alcanzara valores por encima de los 14-16 cm y las heridas de poda generadas no excedieran los 3 cm de diámetro. También sería recomendable que los árboles podados tuvieran buenos crecimientos en grosor, siendo esperable, por su correlación positiva con la velocidad de oclusión de las heridas, que el cierre del centro defectuoso se alcanzara en un plazo menor.

Tabla 3.11. Valores medios de la velocidad de cierre de las cuatro heridas podadas de mayor tamaño, del incremento anual en diámetro y diámetro sobre muñón en las diferentes alturas del fuste evaluadas, junto con las medias de diámetro medio de las cuatro heridas de poda de mayor tamaño, diámetro normal del árbol y diámetro máximo sobre muñón. Se diferencian los valores de los árboles en función de las heridas de mayor tamaño seleccionadas ocluidas cuatro años después de la poda (invierno 2009-2010) en el ensayo de *Pinus radiata* situado en el monte de La Campa.

Ndr_{m_o}	o_{dr_m}	ic_d	ic_{DSM_j}	dr_m	d	DSM_m
1	0,478	1,2640	1,069	3,5	12,8	17,1
2	0,503	1,2667	1,021	3,2	12,1	16,1
3	0,562	1,3544	1,167	3,3	11,8	15,7
4	0,558	1,550	1,342	2,3	10,9	14,3

donde Ndr_{m_o} es el número de heridas ocluidas, considerando tan solo las cuatro heridas de mayor tamaño (una de cada cuadrante); o_{dr_m} es la velocidad de oclusión anual media de las heridas de mayor tamaño, en cm/año; ic_d es el crecimiento anual medio en diámetro normal, en cm/año; ic_{DSM_j} es el crecimiento anual medio en diámetro sobre muñón, en cm/año; dr_m es el diámetro medio de la herida de poda tras la intervención, en cm; d es el diámetro normal medio, en cm; y DSM_m es el diámetro máximo sobre muñón medio, en cm.

La mayoría de los trabajos que se pueden consultar en la bibliografía han observado que el engrosamiento necesario para el cierre de las heridas en *Pinus radiata* y *Pinus taeda* oscila entre 2 cm y 6 cm, siendo 3 cm el valor más frecuente. Así, para *Pinus taeda*, Andenmatten *et al.* (2002) y Fassola *et al.* (2002a), mostraron que el engrosamiento producido tras la poda tenía valores comprendidos entre 2 cm y 3,3 cm. Para *Pinus radiata*, Private Forests Tasmania (2004) cifró el engrosamiento en 3 cm mientras que Espinosa y Muñoz (2005) indicaron valores mayores, con un engrosamiento medio de 6 cm. Sotomayor *et al.* (2002), por su parte, indicaron que el diámetro sobre oclusión (DSO) era de 3-6 cm por encima del diámetro máximo sobre muñón (DSM_m) en *Pinus radiata*, dependiendo de factores como la calidad de corte, el tamaño de las ramas cortadas, el crecimiento del árbol o la calidad de estación. Prueba de ello fue el trabajo de Palazuelos (1995), quien observó relaciones lineales entre el tamaño de oclusión y el diámetro de la rama podada, reportando valores de 3 cm para la oclusión de ramas de 1,5 cm de diámetro y de 5,5-7,5 cm de oclusión para ramas con grosores de 5 cm. Para *Pinus pinaster* no se han encontrado estudios que relacionen estos diámetros (DSM_m y DSO), siendo por ello necesario realizar un seguimiento de los mismos para trabajos posteriores. En cualquier caso, y para *Pinus radiata*, los valores anteriormente comentados coinciden con lo observado en el rodal evaluado en el presente estudio (situado en el monte de la Campa), de acuerdo con el ritmo de crecimiento en las zonas que contienen las ramas podadas (ic_{DSM_j}) y el estado de oclusión de las ramas podadas tres años después del tratamiento. Parte de este resultado se debe a la gran variabilidad existente en las masas evaluadas, y a la realización de la poda en ramas con grosores por encima de los valores óptimos para su cierre en el intervalo

de tiempo considerado. En cualquier caso, y aunque será necesario realizar un seguimiento más detallado del cierre completo de las heridas de ambas coníferas, considerando además otros factores influyentes en la cicatrización, y evaluando dicho proceso para un mayor rango de sitios de ensayo, fue realizada una primera estimación del porcentaje de madera limpia que habría al final del turno en función del diámetro normal del árbol en el momento de la poda, considerando un engrosamiento medio de 6 cm en ambas especies, y utilizando las Ecuaciones (3.1) y (3.2) previamente definidas. De acuerdo con esto, se representa en la Figura 3.14 el porcentaje de madera libre de nudos para los casos hipotéticos de diámetro normal en el momento de la corta final de 35 cm y 40 cm en ambas coníferas.

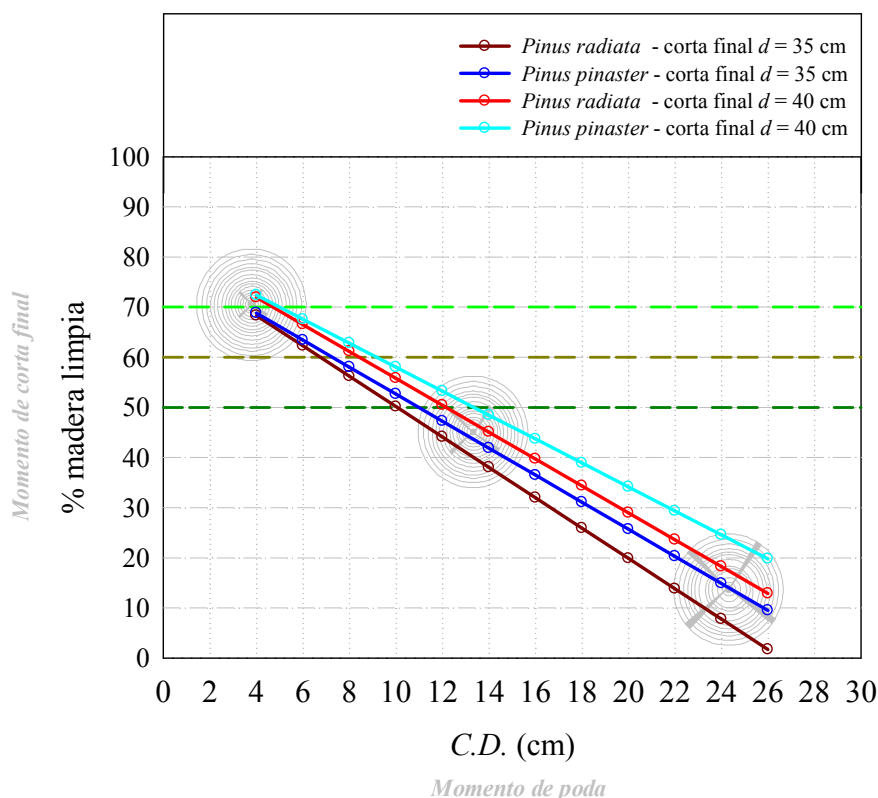


Figura 3.14. Porcentaje de madera limpia obtenido al final del turno en función de la clase diamétrica del árbol (C.D., cm) en el momento de poda y un engrosamiento medio de 6 cm para pies de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster*.

De acuerdo con la Figura 3.14, la poda de árboles de clases diamétricas (C.D.) inferiores o iguales a 10 cm permitiría obtener los mejores resultados para la optimización del tratamiento y la obtención de productos de mayor calidad. La poda de árboles con C.D. superiores, especialmente a partir de 20 cm, tamaño relativamente común para la poda de árboles en Asturias, suponen un gasto económico que no se verá recuperado al final del turno, dando lugar a productos con muy bajo porcentaje de madera limpia. Comparativamente, *Pinus radiata* mostró un menor porcentaje de madera libre de nudos para un mismo diámetro en el momento de la poda, dado el mayor engrosamiento producido en esta especie en relación con

el diámetro normal del fuste. Es por ello que resulta aun más importante para *Pinus radiata* tener la precaución de no podar árboles de excesivo diámetro, debiendo, en todo caso, realizar técnicas de corte y emplear herramientas de poda que faciliten la cicatrización de las heridas, ya que estos factores afectarán directamente al resultado final de la operación y a la calidad del producto obtenido. En cuanto al grosor del árbol en el momento de la corta, y como era de esperar, los mayores porcentajes de madera limpia en ambas especies se obtuvieron para el diámetro de corta de 40 cm.

Teniendo en cuenta el engrosamiento necesario hasta alcanzar el cierre de las heridas de poda, diversos trabajos han indicado valores máximos aceptables del *DSO* a partir de los cuales la poda no estaría justificada. Así, Chauchard y Olalde (2005), indicaron, para *Pinus radiata* en el País Vasco que el valor del *DSO* no debía superar los 20-30 cm, Según dichos autores, al igual que Park (1982), podría considerarse que valores del *DSO* iguales o superiores a 30 cm indicarían una poda atrasada y poco eficaz para producir madera limpia. Por otra parte, trabajos realizados para *Pinus radiata* en Nueva Zelanda (Knowles *et al.*, 1987) y Australia (England, 1998) recomendaron un *DSO* objetivo inferior, con valores comprendidos entre 18-20 cm. Meneses y Velasco (1995, cit. por Palazuelos, 1995) también señalaron valores del *DSO* objetivo de 18-20 cm para *Pinus radiata* en Chile. Por tanto, de acuerdo con estas indicaciones y el hecho de que el cierre de las heridas requiera de un engrosamiento que puede llegar a alcanzar los 5-6 cm, sería recomendable que el grosor del árbol en el momento de la poda estuviera comprendido entre 8-12 cm, dado que el DSM_m será aun superior al diámetro normal del árbol. En cualquier caso, y dado que la severidad de poda afectará al posterior crecimiento y desarrollo de estos árboles, será necesario realizar un análisis más profundo, en el que se considere una mayor cantidad de factores determinantes en la calidad final de la madera. Asimismo, será necesario realizar un análisis conjunto para las dos fases experimentales diseñadas, considerando la respuesta de los árboles a diferentes intervenciones de podas y claras.

Además de lo comentado, y tal y como ya se ha indicado en la parte introductoria del presente capítulo, la cicatrización de las heridas va a estar directamente relacionada con la calidad de corte de las heridas y la herramienta empleada en la operación. Esto ha sido demostrado en diversos estudios llevados a cabo en plantaciones de coníferas de Chile, Nueva Zelanda y Argentina (p.e. Meneses y Guzman, 2000; Fassola, 2001; O'Hara, 2007), en los que fue observada la influencia de la herramienta utilizada y la calidad de la técnica de corte sobre la profundidad de la oclusión de las heridas de poda. Relacionado con esto, O'Hara y Buckland (1996) y Briggs (1990, cit. por Petruncio *et al.*, 1997), entre otros, encontraron una oclusión más lenta a mayor tamaño del muñón de la rama podada. Por otra parte, el tamaño del muñón ha mostrado estar relacionado también con la propia especie y con el tipo de corteza de la misma (en alguno casos, mayores diámetros se relacionan con

cortezas más gruesas) (p.e. Petruncio *et al.*, 1997; Silcock, 2009). Esto resulta importante por el hecho de que un mismo tamaño de la herida de poda, aun con un corte realizado de forma adecuada, puede dar lugar a una mayor superficie para cubrir antes de la formación de madera limpia si la herida presenta un mayor muñón. Por ello la longitud del muñón en el proceso de cicatrización ha sido considerada como variable dependiente en diversos modelos de cicatrización. Ejemplo de ello es el trabajo de O'Hara y Buckland (1996), quienes encontraron que los años para la oclusión de las heridas aumentaban a mayor diámetro y longitud del muñón, y decrecían a mayor ratio de crecimiento radial. Asimismo, se debe señalar que el estado de las ramas ha mostrado ser igualmente importante en el tiempo necesario para el cierre de las heridas, esperando que ramas muertas precisen de mayor tiempo para la cicatrización que ramas en estado vivo. Por todo ello, y a la espera de estudios posteriores más detallados, se podría indicar, de acuerdo con la bibliografía, la importancia de podar ramas de menor tamaño, preferentemente vivas, y en las que el corte de la rama genere la mínima longitud del muñón (p.e. Briggs, 1990, cit. por Petruncio *et al.*, 1997; Petruncio *et al.*, 1997; Briggs, 1999; Ikonen, 2008).

Todos estos aspectos comentados, relacionados con el proceso de cicatrización de las heridas de poda, resultan de especial interés por su relación directa con el tamaño que adquiere el centro con defectos. Por tanto, todos ellos deberán ser considerados para la optimización de la operación de poda, en busca de la máxima producción de madera de calidad. Sin embargo, para una correcta evaluación de la cicatrización de las heridas será necesario realizar futuros trabajos en los que se realice la evaluación de un mayor rango de situaciones, con masas ubicadas en sitios de diferente calidad, distintas herramientas y calidad de corte o época de poda, entre otros. También resultará de importancia desarrollar estudios para *Pinus pinaster*, por ser una especie de gran interés productivo para la zona norte peninsular, y cuya respuesta a la poda ha sido poco estudiada. Además, será también necesario realizar un seguimiento de las heridas de mayor tamaño situadas en el DSM_m , por ser la cicatrización de las mismas un paso determinante en el cierre de este diámetro y por tanto en el tamaño final del centro nudoso y en la cantidad de madera limpia formada al final del turno. Por último, se debe considerar también que los mejores resultados de la operación selvícola de poda solo se van a conseguir cuando ésta sea combinada con la clara, debiendo atender también al posible mayor engrosamiento de las ramas tras la realización de la clara. Por ello, en estos casos, cuando se precisa de realizar una poda alta tras la clara resultará necesario atender al diámetro de las ramas para intervenir en un momento en el que las heridas de poda no excedan los valores recomendados.

3.3.4. Aparición de brotes epicórmicos tras la poda

Las parcelas permanentes de ensayo de *Pinus pinaster* no mostraron brotes epicórmicos en los árboles podados en ninguno de los inventarios realizados. Este tipo de formaciones como respuesta a la poda no han sido encontradas tampoco en los diferentes trabajos publicados con esta especie. De acuerdo con lo anterior, los resultados mostrados en este apartado se corresponden tan solo con la especie *Pinus radiata*.

La evaluación de las parcelas, realizada dos años después de la poda, mostró brotes epicórmicos en un total de 585 árboles de *Pinus radiata*, correspondiente con el 11% del total de los árboles podados en las parcelas de esta especie, siendo evaluados un total de 1.917 brotes epicórmicos. De estos 585 árboles con respuesta a la poda mediante la formación de brotes, un 44,10% de los pies presentaban tan sólo un brote epicórmico en el fuste podado, un 21,38% dos brotes, un 10,60% tres brotes, un 8,38% cuatro brotes y el 15,54% restante de los pies mostraban más de cuatro brotes epicórmicos en el fuste.

El total de árboles con respuesta en el tiempo evaluado presentaron, por lo general, una menor frecuencia de estas formaciones para las mayores clases diamétricas (*C.D.*) y de longitud de copa remanente tras la poda (*Clase L_{copa}*) (Figura 3.15). De acuerdo con esta figura, la aparición de brotes se mantuvo distribuida en todas las *C.D.* de los pies podados. De todas estas clases, los valores de diámetro normal (*d*) recomendados en los apartados anteriores para la realización de una poda óptima que permita obtener suficiente madera limpia (8-12 cm) muestran una mayor frecuencia de brotes que aquellos que presentan valores de *d* mayores. Por ello, y dado que el grosor del fuste en el momento de la poda ha mostrado ser fundamental para la calidad de la misma, en esta especie habría que prestar especial atención a la aparición de estas formaciones en el tronco como respuesta a la poda. Por otra parte, de acuerdo con los resultados obtenidos para la *L_{copa}*, podría ser aconsejable que la poda de los árboles no supusiera una reducción excesiva de la misma, tratando de mantener copas remanentes no inferiores a 4 metros. Asimismo, es previsible que valores de *L_{copa}* inferiores a 4 metros puedan llegar a afectar en mayor medida al crecimiento de los árboles. Otros autores como Oliva y Colinas (2007) y Culpepper (2012), han evaluado la relación existente entre la aparición de brotes epicórmicos y el tamaño de la copa, clasificando ésta por clases de dominancia del árbol, observando en su mayoría una menor frecuencia de brotes en los árboles dominantes, con mayor *L_{copa}*. La menor frecuencia de brotes a mayores valores de *d* y *L_{copa}* fue observada también por Lange *et al.* (1987) para *Pinus radiata* en Sudáfrica y por O'Hara y Valappil (2000) para *Larix occidentalis* en Estados Unidos. En ese caso, la evaluación de los brotes para una mayor escala temporal

mostró, además, que la frecuencia de estas formaciones se reducía con el transcurso del tiempo en todas las clases diamétricas y de longitud de copa.

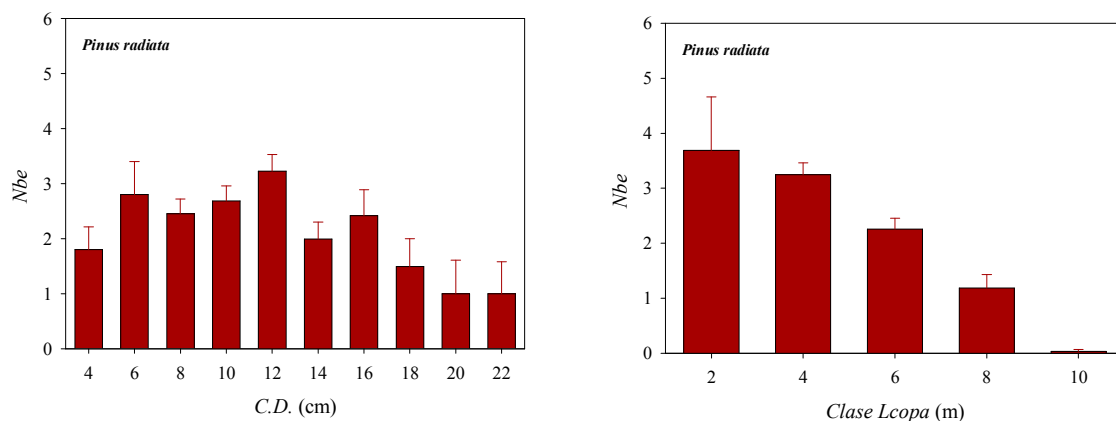


Figura 3.15. Número medio de brotes epicórmicos (N_{be}) presentes en los árboles con respuesta dos años después de la poda (invierno 2007-2008), en función de la clase diamétrica ($C.D.$, cm) (izquierda) y la clase de longitud de copa ($Clase L_{copa}$, m) del pie intervenido.

El primer análisis de varianza realizado para el conjunto de árboles podados, considerando el sitio de ensayo, no mostró diferencias significativas entre las parcelas evaluadas. De todas ellas, la parcela situada en el monte de Santa Catalina mostró el mayor número medio de brotes por árbol (N_{be}) para todos los tratamientos, incluido el control (N_{be} de 0,41). Dicha parcela se encontraba con una gran competencia y poca penetración de luz en la masa antes de los tratamientos, con lo que el mayor cambio en la luminosidad sobre el fuste de los árboles tras la poda podría estar relacionado con este resultado. Santa Catalina fue, además, la parcela que mostró mejores crecimientos medios anuales en diámetro y altura tras la poda. Otros trabajos como el de Deal *et al.* (2003) sí observaron diferencias significativas en la frecuencia de brotes para distintos sitios de estudio.

En realidad, resulta difícil poder asociar una única causa a las diferencias observadas en la formación y desarrollo de brotes epicórmicos de los diferentes ensayos evaluados. Tal y como apuntaron O'Hara y Berrill (2009), el desarrollo de estas formaciones como repuesta a la poda en especies de coníferas resulta complicado por la influencia de diversos procesos que a su vez interaccionan entre sí. Por una parte, existe la influencia de las condiciones del sitio, especialmente las condiciones ambientales, así como la edad y el tamaño del árbol podado. Por otra parte, se encuentra el efecto de las propias características internas del árbol, entre las que destacarían las propiedades genéticas del material empleado. Dentro de estos caracteres, la frecuencia verticilar, el ángulo de la rama, su tamaño y la aparición de brotes han mostrado ser altamente heredables, siendo por ello objeto de selección en los programas de mejora de algunas especies productivas como *Pinus radiata*. Así, por ejemplo, la heredabilidad descrita para el carácter tamaño de las ramas oscila entre 0,14 y 0,54 (Wu *et al.*, 2007). Gracias a los programas de selección de países

como Nueva Zelanda (Jayawickrama *et al.*, 1997) existen además variedades con bajo número de verticilos, cuya utilización para la obtención de madera de calidad permite evitar la necesidad de realizar podas intensivas para obtener este tipo de producto.

La distribución de brotes en el fuste podado del presente trabajo mostró una mayor frecuencia de los mismos en la orientación sur, seguida de la parte del fuste comprendida entre el sur y el este (Figura 3.16, derecha), siendo además en la zona central del tronco en donde se observó la mayor cantidad de brotes (Figura 3.16, izquierda).

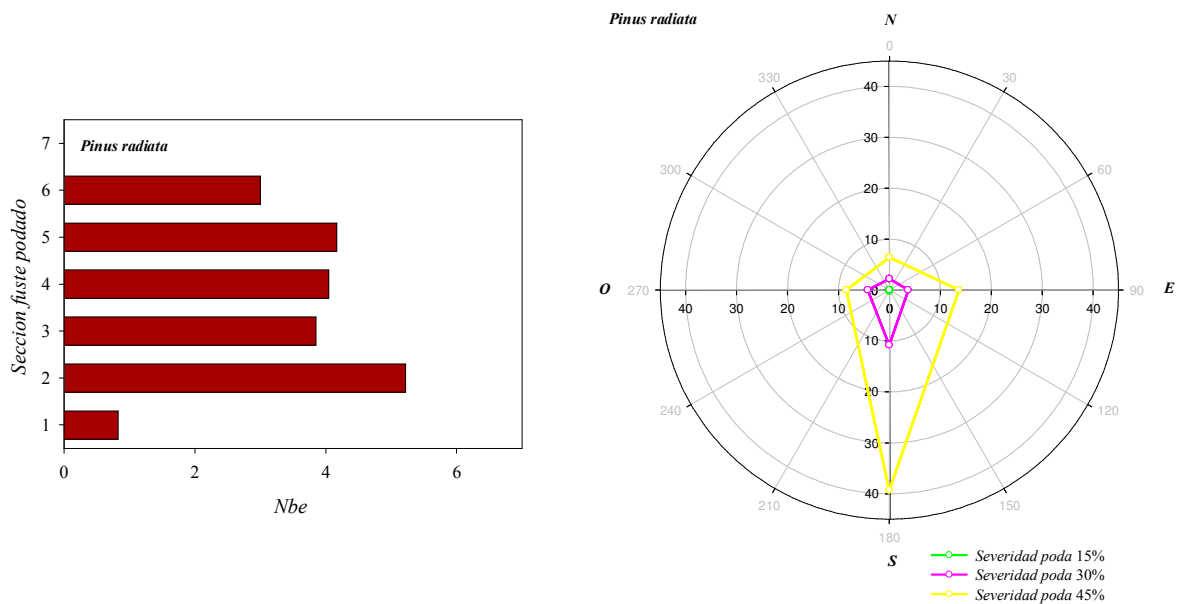


Figura 3.16. Número medio de brotes por árbol considerando el fuste podado por secciones (p.e. sección 1 sería la más baja, correspondiente con 1/6 del fuste podado) (izquierda); y porcentaje de brotes epicórmicos desarrollados en el total de las parcelas de *Pinus radiata*, en función de la orientación en el tronco y la severidad de poda, dos años después de la intervención (invierno 2007-2008) (derecha).

Diversos trabajos previos han confirmado que la luz es un factor importante en el desarrollo de brotes en el fuste podado, con una mayor cantidad de estas formaciones en la dirección sur que en el resto de direcciones (p.e. Lange *et al.*, 1987; Collier y Turnbull, 2001; Deal *et al.*, 2003; Waring y O'Hara, 2005; Binot y Adégbidi, 2006; Dean *et al.*, 2007; O'Hara *et al.*, 2008; O'Hara y Berrill, 2009).

En cuanto a la distribución de los brotes en el fuste, otros trabajos como los de Collier y Turnbull (2001), y O'Hara y Berrill (2009), indicaron también la mayor frecuencia de los mismos en la mitad del fuste podado, y la menor frecuencia de éstos en las zonas superior e inferior del tronco. Esto podría ser explicado, de acuerdo con diversos trabajos previos (Waring y O'Hara, 2005; Binot y Adégbidi, 2006; O'Hara, 2008; O'Hara y Berrill, 2009), por la mayor sombra en la parte superior del tronco como consecuencia de la mayor expansión de la copa tras la

poda, y por la vegetación del estrato subarbóreo en la parte inferior del fuste. La dinámica de reducción de los brotes epicórmicos con el tiempo en esas zonas del árbol estaría relacionada, de acuerdo con dichos trabajos, con la muerte y desaparición de los mismos ante la falta de luminosidad. Trabajos como el de O'Hara y Berrill (2009) observaron que dicho comportamiento daba lugar a un desplazamiento en la distribución vertical de los brotes en el tronco con el tiempo.

Si bien es cierto que la mayor exposición de luz en el fuste ha sido apuntada en la bibliografía como uno de los motivos de aparición de brotes epicórmicos en masas podadas, otra de las causas principales apuntada ha sido la reducción de la capacidad fotosintética asociada a la poda (Kozlowski y Pallardy, 1997; Deal *et al.*, 2003; Quine, 2004; Dean, 2007; O'Hara y Berrill, 2009). De acuerdo con Ishii y Ford (2001) o Ishii *et al.* (2002), la respuesta del árbol mediante la aparición de brotes se corresponde con una adaptación que permite a los pies reconstruir la copa tras una perturbación que haya causado defoliación o daño en las ramas. Sin embargo, según O'Hara y Berrill (2009), a diferencia de otras perturbaciones (p.e. el fuego, el viento o el daño por heladas), la poda supone una reducción más uniforme en la zona basal de la copa y causa una reacción relativamente más equilibrada en el desarrollo de brotes para las especies más susceptibles. Además, diversos autores (p.e. Waring y O'Hara, 2005; O'Hara *et al.*, 2008) han apuntado que durante la reconstrucción de la copa tras la poda las ramas epicórmicas de la parte baja del fuste se convierten en fuentes menos importantes de los productos de la fotosíntesis ya que el árbol está incrementando su altura y expandiendo la copa hacia arriba y hacia afuera.

Por lo general, el número de brotes medio por árbol fue superior a mayor intensidad de poda. El análisis de varianza por severidad de poda, para el conjunto de árboles podados, mostró diferencias significativas entre algunos de los tratamientos efectuados. Así, el tratamiento más débil (severidad del 15%), que presentó una media de 0,02 brotes por árbol, y el tratamiento más severo (45%), en el que el número de brotes medios por árbol fue de 0,67, mostraron diferencias significativas entre ellos. El tratamiento de mayor severidad (45%) mostró igualmente diferencias significativas con la poda intermedia (severidad del 30%), que presentó una media de 0,15 brotes por árbol. Sin embargo, las diferencias entre los tratamientos de severidades 15% y 30% no resultaron ser significativas.

Por otra parte, del total de árboles con respuesta, tan solo cuatro de ellos pertenecían al tratamiento de poda de menor severidad (15%), apareciendo la mayoría de estas formaciones en los fustes podados con las severidades del 30% y 45%. Así, del total de árboles con respuesta el 0,7% pertenecían al tratamiento de poda más débil (severidad del 15%), el 29,9% al tratamiento intermedio (severidad de poda del 30%) y el 69,4% restante al tratamiento de mayor intensidad (severidad del 45%). El valor medio de los brotes desarrollados por árbol, considerando

únicamente los pies con respuesta, fue de 2,59 para el tratamiento de severidad del 30% y de 3,23 para la poda del 45%, no habiendo diferencias significativas entre dichos tratamientos. La mayor frecuencia de brotes epicórmicos a mayor severidad de poda fue observada también, para diferentes especies forestales, por autores como Stein (1955), O'Hara y Valappil (2000), Collier y Turnblom (2001), Deal *et al.* (2003), Waring y O'Hara (2005), Binot y Adégbidi (2006), Dean (2007), O'Hara *et al.* (2008), y O'Hara y Berrill (2009). Sin embargo, el número de brotes formados en función de la intensidad de poda no fue significativamente diferente en todos los casos (p.e. Deal *et al.*, 2003). Asimismo, atendiendo a trabajos efectuados durante un mayor período temporal (p.e. Waring y O'Hara, 2005; Binot y Adégbidi, 2006; O'Hara *et al.*, 2008) cabría esperar que, a pesar de que existe cierta tendencia a disminuir el número de brotes con el tiempo, las formaciones epicórmicas desarrolladas en los árboles podados con mayor intensidad han mostrado permanecer adheridas al tronco durante un mayor período de tiempo. De acuerdo con esto, resultaría necesario realizar un seguimiento del desarrollo y persistencia de los brotes que puedan aparecer tras la poda, especialmente en los tratamientos de mayor severidad, siendo imprescindible la eliminación de aquellas formaciones que muestren un mayor desarrollo, por la influencia negativa que éstas presentan sobre la calidad del producto.

Un análisis más detallado dentro del fuste podado permitió evaluar la posición de los brotes epicórmicos en el fuste, en términos de su origen, siendo éste un aspecto hasta el momento poco estudiado (Tabla 3.12).

Tabla 3.12. Porcentaje de brotes epicórmicos desarrollados como respuesta a la poda, en función de su estado y posición en el árbol, dos años después de la intervención (invierno 2007-2008), para cada severidad de poda (agrupada en 15%, 30% y 45%), en los árboles con respuesta en las cuatro parcelas permanentes de *Pinus radiata* estudiadas.

Severidad poda	Estado (%)		Posición (%)			
			Entre verticilos		Verticilo	
	Nbe_v	Nbe_m	Nbe_evert	Nbe_vert	Nbe_nud	Nbe_enud
15	0,27	0,09	0,18	0,18	0,13	0,05
30	22,01	1,94	18,29	5,58	0,73	4,85
45	60,26	15,44	61,96	13,81	1,42	12,39

donde *Nbe_v* se corresponde con los brotes vivos; *Nbe_m* son los brotes muertos; *Nbe_evert* son los brotes situados entre verticilos; *Nbe_vert* son los brotes situados en un verticilo; *Nbe_nud* son los brotes situados en un nudo; *Nbe_enud* son los brotes situados entre nudos. Todos ellos en %, referidos al total de brotes aparecidos en los cuatro ensayos de *Pinus radiata* evaluados; y *Severidad poda* es la intensidad real de poda, en %.

Los resultados recogidos en la Tabla 3.12 muestran, para todos los tratamientos de poda, una mayor frecuencia de los brotes entre verticilos, en comparación con los

brotos surgidos dentro del verticilo. De todos ellos, aproximadamente el 62% del total de los brotes aparecen en el tratamiento de severidad del 45%, estando cerca del 18% de los brotes en la severidad de poda del 30%. En cuanto a los brotes que fueron originados dentro del verticilo, la posición ubicada entre nudos fue la que mostró una mayor cantidad de estas formaciones, a excepción del tratamiento de poda más débil (15%), para el que la proporción de brotes entre verticilos y en el verticilo fue la misma (0,18%). Collier y Turnblom (2001), por su parte, observaron que podas moderadas en *Pseudotsuga menziesii* mostraban con mayor frecuencia brotes en el propio verticilo, apareciendo formaciones epicórmicas en el verticilo y entre verticilos cuando las podas eran severas.

Por otro lado, la caracterización de los brotes epicórmicos por su extensión y, en ese caso, por su tamaño, mostró la mayor respuesta de los árboles a mayor intensidad de la poda, formando un mayor porcentaje de brotes extendidos, que además presentaron un mayor promedio en longitud y grosor (Tabla 3.13).

Tabla 3.13. Características de los brotes epicórmicos desarrollados en función de su extensión y tamaño (solamente brotes extendidos), considerando la severidad de poda, para los árboles con respuesta presentes en las cuatro parcelas permanentes de *Pinus radiata* dos años después de la poda. Distintas letras indican distintos grupos en el test de comparación de medias de Tukey ($\alpha = 95\%$).

Severidad poda	Extensión (%)		Longitud			Grosor		
			%		cm	%		mm
	<i>Nbe_ex</i>	<i>Nbe_Nex</i>	<i>Nbe_l</i>	<i>Nbe_c</i>	<i>Lbe</i>	<i>Nbe_g</i>	<i>Nbe_f</i>	<i>Dbe</i>
15	0,18	0,18	0,00	0,52	3,29 (1,44) ^a	0,00	0,34	2,11 (0,61) ^b
30	19,47	4,28	4,19	19,57	7,25 (7,72) ^a	8,64	14,29	2,85 (1,43) ^b
45	64,17	11,72	13,42	62,30	7,23 (7,41) ^a	38,75	37,98	3,37 (1,59) ^a

donde *Nbe_ex* son los brotes extendidos, en %; *Nbe_Nex* son los brotes no extendidos, en %; *Nbe_l* son los brotes extendidos considerados como largos (*Lbe* > 10 cm), en %; *Nbe_c* son los brotes extendidos considerados como cortos (*Lbe* < 10 cm), en %; *Lbe* es la longitud media del brote epicórmico, en cm; *Nbe_g* son los brotes extendidos considerados como gruesos (*Dbe* > 3 mm), en %; *Nbe_f* son los brotes extendidos considerados como finos (*Dbe* < 3 mm), en %; y *Dbe* es el diámetro medio del brote epicórmico, en mm, y *Severidad poda* es la intensidad real de poda, en %.

Tal y como se recoge en la tabla anterior, prácticamente el 76% del total de brotes epicórmicos que aparecieron en las parcelas estuvieron presentes en el tratamiento de poda de severidad del 45%, estando en torno al 23% de ellos en la severidad del 30% y menos del 1% en la severidad del 15%. En el tratamiento de poda de mayor severidad (45%), además, más de la mitad de los brotes fueron extendidos, siendo en su mayoría brotes con poca extensión (*Nbe_c*). El diámetro de los brotes (*Dbe*) mostró diferencias significativas para el factor poda, con un valor superior a mayor intensidad del tratamiento. La longitud (*Lbe*) de los brotes también mostró mayores

valores con la poda, no mostrando, en cambio, diferencias significativas. Estos resultados para la *Lbe* fueron coincidentes con el trabajo de O'Hara y Berrill (2009), en donde tampoco encontraron diferencias significativas en el tamaño de los brotes entre tratamientos. Collier y Turnblom (2001), y Binot y Adégbidi (2006), entre otros, observaron también un mayor tamaño medio de los brotes con la intensidad de poda. Por todo lo anterior, y para el presente estudio, la mayor frecuencia de formaciones epicórmicas (64% del total de brotes) en el tratamiento de mayor severidad (45%) indica la necesidad de tener una mayor precaución para la realización de tratamientos de dicha intensidad en *Pinus radiata*, siendo, en cualquier caso, brotes mayormente de poca extensión.

La caracterización del tamaño de los brotes resulta realmente importante por su posible influencia en la calidad de la madera. Tal y como indican Deal *et al.* (2003), entre otros, el desarrollo y persistencia de brotes que adquieran mayor tamaño es un problema serio que llega a reducir el valor de la poda como tratamiento selvícola para mejorar la calidad de la madera. En este aspecto, se pueden encontrar en la bibliografía algunos valores críticos a partir de los cuales los brotes pasarían a depreciar de forma apreciable el valor final de la madera. Considerando esto, fueron seleccionados como valores de referencia para este trabajo un diámetro del brote de 3 mm y una longitud de 10 cm. Otros autores como Deal *et al.* (2003) emplearon también la referencia de 3 mm para la clasificación de su diámetro, mientras que Fontaine *et al.* (2004) realizaron una diferenciación de brotes en 5 mm y 15 mm de diámetro. En cuanto a la longitud del brote, Michalek *et al.* (2004) utilizaron como valor categórico 30,5 cm de longitud para el estudio de la respuesta a la clara de diferentes especies de frondosas. Collier y Turnblom (2001), por su parte, establecen 30 cm para la clasificación de brotes largos en *Pseudotsuga menziesii*, basándose en la idea de que brotes más largos tendrán mayor probabilidad de generar nudos significativos y por tanto reducir la calidad de la madera si permanecen en el tronco.. Atendiendo a estas recomendaciones, en el presente trabajo no fueron observados brotes que superaran dichos valores para el tratamiento de poda más débil (severidad de poda del 15%), siendo muy pocos los brotes en que se pudo caracterizar su tamaño, por tratarse de deformaciones epicórmicas, en su mayoría, no extendidas. Sin embargo, para las severidades de poda del 30% y 45% sí fueron encontrados brotes con tamaños críticos, estando presentes con mayor frecuencia en los árboles podados con mayor intensidad (severidad de poda del 45%).

O'Hara y Valappil (2000) indicaron que los brotes largos eran más persistentes en el tiempo y llegaban a formar, con mayor probabilidad, defectos en la calidad de la madera. Por otra parte, estos autores observaron que la mayoría de los brotes que no llegaron a ser extendidos acababan muriendo. De acuerdo con esto, resultaría importante poder evaluar sobre todo el desarrollo y persistencia de los brotes extendidos de mayor longitud. Por ello, fue realizada una diferenciación de los

brotos epicórmicos extendidos en dos clases, los que presentaban brotes largos, y por tanto pudieran generar un mayor problema en la calidad de la madera, y los que presentaban brotes de menor longitud y que *a priori* no fueran a suponer una depreciación importante sobre la calidad final de la madera. Para ambas clasificaciones fueron estimadas las variables dendrométricas de diámetro normal (d), altura total (h) y longitud de copa (L_{copa}) en el momento inmediatamente posterior a la poda con el fin de aportar una mayor información sobre el tipo de árboles que habrían generado brotes epicórmicos de mayor longitud, más limitantes para la calidad final del producto. Así, se muestra en la Tabla 3.14 el valor medio de estas variables (d , h , L_{copa}) para cada ensayo y severidad de poda, diferenciando la presencia o no de este tipo de formaciones epicórmicas.

Tabla 3.14. Promedios de algunas de las principales variables dendrométricas de los cuatro ensayos permanentes de *Pinus radiata* en el momento de la poda, diferenciando los árboles que presentaron posteriormente brotes largos y los que no mostraron este tipo de brotes en el tiempo de estudio.

Parcela	Severidad poda	<i>Lbe</i> < 10 cm			<i>Lbe</i> > 10 cm		
		d	h	L_{copa}	d	h	L_{copa}
Campa	15	17,00	9,37	8,17	-	-	-
	30	12,16	7,84	5,91	11,11	7,53	5,88
	45	12,52	7,95	4,46	12,99	8,09	4,13
Cabada	15	-	-	-	-	-	-
	30	10,29	7,61	5,69	10,48	7,79	6,02
	45	10,79	7,79	4,83	10,62	7,81	4,45
Catalina	15	14,15	7,13	6,33	-	-	-
	30	10,67	6,30	4,70	8,20	5,55	3,95
	45	10,71	6,34	3,68	10,28	6,21	3,39
Fabal	15	17,10	11,35	9,90	-	-	-
	30	12,55	9,14	6,96	11,32	8,68	6,55
	45	13,94	9,82	6,15	11,22	8,31	5,18
Parcela		<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,4843	0,0095	0,0007
Poda		0,0071	0,0420	<0,0001	0,3766	0,6853	0,0008
Parcela*Poda		0,6468	0,4633	0,3099	0,8153	0,8097	0,8351

donde *Lbe* es la longitud media del brote epicórmico, en cm; d es el valor medio del diámetro normal del árbol en el momento de la poda, en cm; h es el valor medio de la altura total del árbol en el momento de la poda, en m; y L_{copa} es el valor medio de la altura total del árbol en el momento de la poda, en m: *Parcela* se corresponde con el nombre del monte en que se sitúa el ensayo; y *Severidad poda* es la intensidad real de poda, en %. En las filas inferiores se presentan los resultados del análisis de varianza para los factores poda, parcela y su interacción.

Este resultado permitió verificar nuevamente que los árboles que presentaban brotes más largos se correspondían, por lo general, con árboles de menor diámetro y altura en el momento de la poda, así como árboles cuya longitud de copa remanente tras la poda también había sido inferior.

De acuerdo con Quine (2004), la longitud, grosor y persistencia de los brotes se encuentran correlacionados de forma positiva con el mayor espaciamiento de los árboles. Collier y Turnblom (2001), por su parte, observaron la mayor cantidad de brotes en las menores densidades de la masa. Todo esto confirma el papel de la luminosidad en la aparición y mantenimiento de los brotes en el árbol, observación realizada también en otros trabajos (p.e. Lange *et al.*, 1987; Collier y Turnblom, 2001; Deal *et al.*, 2003; Waring y O'Hara 2005; Binot y Adégbidi, 2006; O'Hara *et al.*, 2008; O'Hara y Berrill, 2009).

Por todo lo anterior, y teniendo en cuenta que uno de los motivos para la mayor entrada de luz en el fuste es la apertura de espacio, autores como O'Hara *et al.* (2008) recomendaron la realización de podas y claras en momentos diferentes para evitar la creación de grandes claros en la masa y minimizar así la frecuencia de brotes tras la realización de dichas intervenciones selvícolas. Otra recomendación selvícola apuntada por Clatterbuck (2002) y Deal *et al.* (2003) considera la realización de claras de poca intensidad para reducir el cambio en la entrada de luz en la masa y minimizar así la posible formación de brotes epicórmicos. Sin embargo, y de acuerdo con Collier y Turnblom (2001), a pesar de que el mantenimiento de altas densidades en la masa permite disminuir la incidencia de brotes epicórmicos, la mayor competencia en ese tipo de masas supone, por otra parte, un menor ratio de crecimiento de los árboles y por ende una ralentización en la producción de madera limpia. En cuanto a la poda, autores como Valdivieso (1990), Deal *et al.* (2003) o Collier y Turnblom (2001), recomiendan intervenir tan solo en algunos árboles (poda selectiva), para conseguir suficiente sombra que ayude a prevenir la aparición de brotes en los fustes podados. Asimismo, tal y como apuntan Deal *et al.* (2003), la reducción del número de árboles podados supone un menor coste de la operación. En cualquier caso, tal y como señalan Collier y Turnblom (2001), este tipo de podas selectivas requieren la realización de claras para evitar que los árboles no podados, con mayores copas, puedan llegar a superar y crecer por encima de los árboles podados. De forma comparativa entre ambas intervenciones selvícolas, Deal *et al.* (2003) observaron que la mayor formación de brotes epicórmicos en *Picea sitchensis* se producía con la intensidad de clara. Por tanto dada la depreciación que supone el desarrollo y permanencia de brotes en el fuste, de cara a la obtención de madera limpia, resultará necesario continuar evaluando la aparición de estas formaciones en masas gestionadas bajo una selvicultura de podas y claras, con especial atención a las especies que muestren una mayor susceptibilidad a la formación de estos brotes, siendo por ello de gran importancia la evaluación de las

parcelas de *Pinus radiata* tras la segunda fase experimental de los ensayos aquí evaluados.

Por otra parte, y para tratar de relacionar el tamaño de los brotes epicórmicos con algunas variables asociadas con el árbol, con la poda o con la respuesta en crecimiento de los pies intervenidos, fue realizado un análisis de correlación en el que se observaron, por lo general, relaciones más débiles para la longitud del brote (*Lbe*) que para su diámetro (*Dbe*). En cualquier caso, todas las relaciones obtenidas resultaron ser bastante bajas. De todas ellas, la mejor relación con el diámetro del brote fue para la altura relativa eliminada en la poda (*hcr*) ($R^2=0,190$; $p < 0,0001$), mientras que la longitud del brote mostró la mayor correlación con la altura total del árbol (*h*) ($R^2=0,148$; $p < 0,0001$).

Atendiendo tan solo a los sitios evaluados, los brotes más gruesos se observaron en el monte de La Campa, en donde el diámetro del brote superó, de media, los 3 mm indicados por Deal *et al.* (2003) como un tamaño de grosor a partir del cual el brote pasa a tener mayor influencia sobre la calidad de la madera, con la consiguiente depreciación de la misma. Este resultado podría estar relacionado con la mayor altura de poda media que presentaban los pies con respuesta de dicha parcela. El resto de los ensayos mostraron valores medios de los diámetros de los brotes de entre 2,6 mm (en Fabal) y 2,8 mm (en Cabada y Santa Catalina). En cuanto a la longitud de los brotes, destacó la parcela de Fabal que presenta una menor densidad, con un valor medio de 7,5 cm frente a los 4,7-4,8 cm del resto de ensayos. En este caso, la mayor altura media de los árboles con respuesta de esta parcela podría ser uno de los factores asociados con este resultado.

Por otra parte, a pesar de que la poda evaluada en este trabajo fue efectuada en una misma época del año, cabe destacar que diversos estudios han indicado la influencia de este factor sobre la respuesta de los árboles y su predisposición para formar brotes epicórmicos tras la poda (p.e. Sutton y Crowe, 1975; Dean, 2007; O'Hara *et al.*, 2008). De acuerdo con algunos de estos trabajos (p.e. Dean *et al.*, 2007), en muchos casos dicho efecto ha sido transitorio, siendo mayor la reducción mostrada para el tratamiento efectuado en otoño e invierno que para aquel realizado en primavera. Asimismo, autores como Sutton y Crowe (1975), Dean *et al.* (2007) u O'Hara *et al.* (2008) han señalado que la aparición de brotes resulta más frecuente para la poda efectuada en primavera, siendo además brotes de mayor tamaño que en el caso de las podas realizadas en otoño-invierno. Atendiendo a estas indicaciones, y considerando tan solo el efecto de la poda sobre la aparición de brotes epicórmicos, cabría recomendar la realización de esta intervención selvícola en otoño-invierno, siendo en cualquier caso necesario realizar un estudio posterior para constatar estas recomendaciones en las especies y ámbito geográfico evaluados en el presente trabajo.

La importancia de *Pinus radiata* en la zona norte peninsular y la respuesta de esta especie a la poda con la aparición de brotes epicórmicos debe ser considerado dentro de la selvicultura de esta especie. Esta puntualización resulta importante principalmente por el impacto que la producción de brotes puede tener sobre la calidad de la madera, pudiendo llegar a incrementar la nudosidad, depreciando la madera para su uso estructural. En este aspecto, una adecuada selvicultura podría minimizar la aparición de brotes epicórmicos en el tronco mediante la realización de tratamientos que no supongan una apertura del espacio importante, que pueda implicar un gran cambio en las condiciones de luz en el tronco. Es interesante destacar que *Pinus pinaster* no ha mostrado brotes epicórmicos para masas gestionadas bajo el mismo esquema de podas que *Pinus radiata*. Esto debe ser considerado tanto en el tipo de selvicultura a aplicar para cada conífera como en la selección de la especie a gestionar con el fin de mejorar la calidad de su madera. La apertura de espacio y mayor entrada de luz, o la mayor reducción de la copa por la poda, ha mostrado un mayor efecto sobre *Pinus radiata* que sobre *Pinus pinaster*. Por tanto, para la obtención de madera de calidad en masas de *Pinus radiata* será necesario atender a la aparición de brotes como consecuencia de la gestión selvícola realizada, debiendo eliminar dichas formaciones, siendo ésta una actividad con un coste añadido sobre la gestión de la masa.

Por último, cabe destacar que a pesar de que la evaluación de brotes epicórmicos aquí presentada se corresponde tan solo con una medición de las parcelas, la ausencia de estudios de este tipo en las masas de coníferas de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* del ámbito atlántico, hace que los resultados aquí presentados adquieran mayor importancia como evaluación preliminar de la respuesta de los árboles a la poda. La evaluación de los ensayos tras la segunda fase experimental permitirá obtener, además, una mayor información sobre la persistencia y desarrollo de los brotes, y la susceptibilidad de estas especies a la realización conjunta de podas y claras.

3.4. Conclusiones

La intensidad real de poda definida en función de la altura eliminada en cada árbol ha mostrado ser más exacto que el criterio inicialmente utilizado en el diseño experimental, basado en el número de verticilos.

Las variables de copa y fuste evaluadas en ambas especies han presentado diferencias significativas para las severidades de poda consideradas (15%, 30% y 45%). El valor promedio de estas variables alcanzó generalmente valores superiores para *Pinus radiata* que para *Pinus pinaster*. Los mayores valores del índice de ramosidad *BIX* para la longitud del fuste podado y del diámetro máximo sobre

muñón, de gran influencia en la cantidad y la calidad de la madera libre de defectos formada tras la poda, han sugerido que la poda efectuada para la especie *Pinus radiata* ha resultado algo tardía.

El máximo diámetro sobre muñón estuvo situado en torno al primer metro desde el suelo, con una altura promedio de 0,9 m en *Pinus pinaster* y de 1,1 m en *Pinus radiata*.

El diámetro máximo sobre muñón en el momento de la primera poda mostró una alta asociación con el diámetro normal y el diámetro sobre muñón en el último verticilo podado en ambas coníferas. Estas variables, de fácil medición en el momento de la poda, podrían ser utilizadas por tanto como indicadoras del mejor momento para realizar la intervención, a partir de relaciones que permitan predecir el valor del diámetro máximo sobre muñón. De todas las relaciones evaluadas, la mejor fue para el diámetro normal del árbol, siendo ajustado un modelo lineal de estimación del diámetro máximo sobre muñón en función del valor del diámetro normal del árbol en el momento de la poda para cada especie.

Aunque en muchos casos se utiliza la altura total del árbol como indicador para el momento en que se debe realizar la poda, esta variable ha explicado en menor medida la variación del diámetro máximo sobre muñón en ambas especies.

La medición del diámetro máximo sobre muñón en los años sucesivos a la poda ha mostrado una alta asociación para los diferentes inventarios, siendo en los árboles totalmente cicatrizados el valor correspondiente con el centro que contiene los defectos. Esto indica una buena relación entre el diámetro máximo sobre muñón y el diámetro sobre oclusión, de manera que el conocimiento del diámetro máximo sobre muñón en el momento de la poda podría ser una referencia válida para estimar el valor que alcanzará el diámetro sobre oclusión y saber así a partir de qué grosor del árbol se va a generar madera sin nudos.

El crecimiento anual del diámetro sobre muñón no ha presentado diferencias significativas para los distintos verticilos evaluados (primer verticilo, último verticilo y verticilo de mayor grosor), tendiendo a disminuir su valor con la severidad de poda, con una reducción significativa solamente para la poda del 45% en *Pinus radiata*. Los incrementos medios anuales en diámetro sobre muñón fueron superiores para *Pinus pinaster* que para *Pinus radiata*. Todo esto podría indicar unas mejores condiciones para la cicatrización de las heridas de poda en *Pinus pinaster*, debiendo aplicar con cautela la poda de severidad del 45% en *Pinus radiata*.

La cicatrización de las heridas de poda ha sido más lenta a mayor diámetro de la herida podada. Los árboles que mostraron cicatrizadas todas las heridas evaluadas dos años después de la intervención presentaban diámetros medios inferiores a 2 cm, llegando a ocluir el 86% de los árboles con ramas inferiores a 3 cm tres años

después de la operación. El porcentaje de cicatrización ha sido inferior a mayor severidad de poda, siendo también mayor la superficie de rama a cubrir a mayor intensidad del tratamiento.

La posición de las heridas en el fuste ha mostrado tener relación con la velocidad de cierre y tamaño de las heridas, con menores diámetros y tiempo de oclusión para las heridas orientadas al norte respecto a las heridas expuestas al sur. En las orientaciones este y oeste los valores de oclusión y tamaño de ramas han mostrado menos diferencias.

La velocidad de cierre de las heridas de poda ha presentado una relación positiva con el tamaño del árbol, el tamaño de la herida y la altura de la misma en el fuste. También ha sido positiva la relación de dicha velocidad de oclusión con los crecimientos del árbol, especialmente en grosor. Las variables de masa han mostrado relaciones más débiles con la cicatrización, y los índices de competencia independientes de la distancia evaluados han denotado que los árboles dominantes ocluyen con mayor velocidad.

La variabilidad encontrada para la oclusión total de las heridas de poda evaluadas, coincidentes con las cuatro heridas de mayor tamaño repartidas en los cuatro cuadrantes del fuste podado, resalta la importancia de efectuar unas pautas de poda más uniformes, seleccionando árboles que faciliten el cierre de las heridas y empleando intensidades de poda y herramientas de corte adecuadas para cada caso concreto.

Hubo diferencias en la susceptibilidad de las especies para formar brotes epicórmicos tras la poda. *Pinus radiata* ha respondido al tratamiento con la formación de brotes epicórmicos, desarrollados principalmente en los árboles podados con severidades del 30% y 45%. *Pinus pinaster*, en cambio, no ha mostrado ninguna formación epicórmica tras la poda. Este resultado convierte a *Pinus pinaster* en mejor candidato para la poda que persigue producir madera libre de nudos. Los análisis de frecuencia de brotes por árbol no han presentado diferencias significativas por sitio de ensayo, pero sí por severidad de poda, con mayor número de brotes a mayor intensidad del tratamiento. La frecuencia de brotes ha sido menor en los árboles de mayor grosor y longitud remanente de copa. En este tipo de árboles, además, no han sido encontrados brotes de gran longitud que puedan depreciar la calidad final de la madera.

La aparición de brotes en el árbol ha sido más frecuente en la zona central del fuste y la orientación sur. De forma más específica, estos brotes han sido desarrollados, en su mayoría, entre verticilos. Los brotes extendidos han estado en mayor proporción en el tratamiento de poda más severo, no habiendo encontrado este tipo de brotes en el tratamiento de poda más débil.

A pesar de que la producción de brotes epicórmicos como respuesta a la poda no fue muy numerosa en *Pinus radiata* (11% del total de árboles podados, con una media de 2,6 brotes/árbol para la severidad de poda del 30% y de 3,2 brotes/árbol para la poda del 45%), a la vista de los resultados obtenidos sería recomendable adoptar unos principios selvícolas diferentes para esta conífera, tratando de realizar las intervenciones bajo la premisa de reducir la incidencia y el número de brotes epicórmicos que pueden aparecer después del tratamiento, y llevando a cabo el control de aquellas formaciones que pudieran aparecer y mostrar un mayor desarrollo, con el fin de obtener el beneficio esperado de la operación de poda y asegurar la calidad final de la madera.

Algunos de los resultados presentados en esta parte de la tesis se corresponden con datos que tan solo han podido ser obtenidos en un sitio de ensayo para cada especie, o en las diferentes parcelas para una única especie. Por ello, se espera que la consideración de estudios posteriores complementarios, para un mayor rango de masas, con diferentes edades, densidades, y empleando distintas herramientas, para la poda de los árboles en diferentes épocas del año, ayudarán a generar una mayor información sobre la poda como actividad selvícola clave en la producción de madera de calidad. Asimismo, la evaluación de los árboles de ambas coníferas tras la realización de la segunda fase experimental de los ensayos empleados para el presente trabajo, será un paso muy importante en la cuantificación del efecto de las podas y las claras en estas especies. Todo ello, en su conjunto, permitirá trabajar a nivel de árbol individual y del conjunto de la masa, y obtener, a través de la modelización, herramientas de predicción que incluyan ambas intervenciones selvícolas, lo que resultará de gran importancia para la maximización del valor de las masas forestales de estas especies.



CAPÍTULO 4

**Estudio del perfil y la forma del centro
nudoso de árboles podados de *Pinus
radiata* D. Don y *Pinus pinaster* Aiton**

ESTUDIO DEL PERFIL Y LA FORMA DEL CENTRO NUDOSO DE ÁRBOLES PODADOS DE *Pinus radiata* D. Don Y *Pinus pinaster* Aiton

4.1. Introducción

El conocimiento de las características y dimensiones del centro nudoso de un árbol resulta de gran importancia para la determinación de la calidad de su madera. Uno de los puntos clave en la definición del tamaño de este centro defectuoso es su distribución a lo largo del fuste. Habitualmente el tronco de un árbol ha sido caracterizado sin considerar los defectos contenidos en él, mediante el análisis de factores como la conicidad, la forma o el perfil del mismo. De acuerdo con Rodríguez (2005), resulta frecuente la confusión de estos conceptos. La conicidad de un árbol se define como el decrecimiento de su diámetro por unidad de longitud (cm/m); la forma responde a un concepto más complejo, que intenta explicar la apariencia del fuste considerando aspectos como la curvatura del tronco o la geometría de las secciones, y que permite incluir en su definición medidas subjetivas; y finalmente las funciones de perfil se corresponden con la silueta o proyección ortogonal del tronco del árbol sobre un plano paralelo al eje, o lo que es lo mismo, su grado de decrecimiento en diámetro con el incremento de altura (Gray, 1956; Newham, 1992).

En términos generales, se puede hablar de tres teorías que tratan de explicar las causas que originan la **forma del tronco** (Brack, 1999): (1) la teoría mecánica, que asimila el tronco del árbol a una viga empotrada en la base, con resistencia uniforme a la flexión, de tal manera que la forma del tronco estaría regulada por las necesidades mecánicas impuestas por fuerzas externas que actúan sobre el árbol (p.e. viento); (2) la teoría de conducción de agua o teoría nutricional, que intenta explicar la forma del tronco por la necesidad de transporte de agua y nutrientes dentro del árbol; y (3) la teoría hormonal, que se basa en la idea de que las sustancias de crecimiento sintetizadas en la copa controlan la actividad del cámbium modificando el crecimiento radial en ciertas zonas del tronco dando lugar así a su forma.

Es probable que las formas adquiridas por el tronco sean el resultado de la acción combinada de todas estas teorías, así como de diversos factores internos (principalmente genéticos) y externos (calidad del sitio, gestión selvícola, entre otros), que actúan de manera conjunta en el proceso de desarrollo del árbol. Unido a esto, se suma el hecho de que las variaciones en la forma del tronco pueden

producirse también entre árboles de un mismo sitio, e incluso para un mismo árbol, por un crecimiento diferente bajo la copa y dentro de la copa (Larson, 1963), complicando aun más la caracterización morfológica del mismo.

Los cambios en la morfología del fuste, y los factores asociados a dichos cambios, resultan de gran interés para el gestor forestal, ya que la forma final de los troncos será determinante en el manejo y procesamiento de los mismos, el valor potencial de la plantación para los diferentes usos industriales y su rendimiento en la industria. De todos los factores que pueden influir en la forma del fuste, en plantaciones ya establecidas, la selvicultura pasa a ser una herramienta clave para el gestor, dada la influencia que la gestión selvícola puede tener en el desarrollo y crecimiento del árbol, y, en consecuencia, en la forma final del tronco.

Diversos estudios han mostrado que las intervenciones selvícolas más influyentes en la forma del fuste son aquellas que suponen una modificación en la forma y estructura de la copa de los árboles. Así, la realización de claras fuertes ha sido relacionada con la formación de copas más amplias y perfiles del tronco más cónicos (Gray, 1956; Valinger, 1992; Muhairwe *et al.*, 1994). Para autores como Gray (1956), Larson (1963), Myers (1963) o Borosowski y Kolosowski (1971, cit. por Peltola *et al.*, 2002), la forma más cónica de los fustes tras la clara se debe a un cambio en la distribución del crecimiento hacia las zonas basales del tronco. Por el contrario, de acuerdo con Echevarría (1959) y Larson (1965), el mayor crecimiento tras una intervención de poda se produce en las zonas superiores del tronco, cercanas a la copa, lo que podría explicar la mayor forma cilíndrica de los fustes podados encontrada en trabajos como los de Lange *et al.* (1987), O'Hara (1991), Muhairwe (1994) y De Montigny y Stearns-Smith (2001). Sin embargo, de acuerdo con autores como Sutton y Crowe (1975) o Bredenkamp *et al.* (1980), la conformación de los fustes tras la realización de la poda puede no verse modificada cuando se evalúa su efecto a largo plazo.

A pesar de la dificultad que implica explicar mediante expresiones matemáticas el tronco de un árbol, dada la influencia de todos los factores anteriormente comentados, en los últimos años se han ido desarrollando diversos procedimientos que han permitido describir de manera sencilla la forma y perfil del fuste. De todas estas metodologías, las más empleadas hoy en día son los tipos dendrométricos, los coeficientes mórficos y cocientes de forma, así como las funciones de perfil (Diéguez-Aranda *et al.*, 2003).

Una de las primeras metodologías empleadas para el estudio matemático de la forma del tronco del árbol se basó en la interpretación del fuste, bien en su totalidad o en alguna parte del mismo, como un sólido de revolución obtenido a partir de la rotación de una curva que caracteriza el perfil del tronco alrededor de un eje de simetría. Estos perfiles teóricos son conocidos como **tipos dendrométricos** y han

sido diferenciados en cuatro clases: cilindro, cono, paraboloide y neiloide. La representación de estos sólidos de revolución en un sistema de coordenadas, en donde la altura del tronco se corresponde con el eje X y el radio del mismo con el eje Y , da lugar a la ecuación general de la curva que los define, y cuya expresión es (Husch *et al.*, 1982; Diéguez-Aranda *et al.*, 2003; Rodríguez, 2005):

$$y^2 = p \cdot x^k \quad (4.1)$$

donde y es el radio del sólido de revolución (radio del tronco del árbol); p es el coeficiente de amplitud, que varía para cada tipo dendrométrico y árbol (adimensional), y hace referencia a la evolución del radio con la altura; x es la altura del sólido de revolución (altura del tronco del árbol); y k (a veces denominado **coeficiente de forma**) es el exponente característico de la forma del perfil, con valores que varían para cada tipo dendrométrico, siendo 0 para el cilindro, 1 para el paraboloide, 2 para el cono y 3 para el neiloide.

La forma del fuste varía a lo largo de su longitud, lo que dificulta asimilar un solo tipo dendrométrico para el total del tronco. Sin embargo, se ha observado que la interpretación del fuste por zonas permite definir el perfil del fuste como una combinación de los diferentes tipos dendrométricos (Badía *et al.*, 2001). Aunque tal y como se comentó anteriormente existen diferentes factores que pueden afectar al desarrollo del fuste, en general, se admite que las coníferas se aproximan a un tronco de neiloide en su base (zona convexa respecto al eje), a un cilindro en la zona superior a la base, a un tronco de paraboloide en su parte media (zona convexa hacia el exterior), y finalmente, el perfil va definiendo de forma gradual una forma más cónica, asimilándose en su parte superior a un tronco de cono (Diéguez-Aranda *et al.*, 2003; Rodríguez, 2005).

Dos de las limitaciones más importante de esta metodología se relacionan con la posibilidad de que no siempre se puede asignar uno de estos cuatro tipos dendrométricos clásicos al perfil real del árbol y la dificultad que conlleva determinar de forma precisa la zona exacta en la que se produce el cambio de un tipo dendrométrico a otro a lo largo del tronco. Esto ha generado la necesidad de emplear otros métodos que permitan estudiar igualmente la forma del fuste de una manera menos rígida. Tal es el caso de los coeficientes mórficos o de los cocientes de forma, que permiten además determinar el volumen del árbol con mayor exactitud (Diéguez-Aranda *et al.*, 2003).

El **coeficiente mórfico** se define como el cociente entre el volumen real del tronco del árbol y el de un modelo que se toma como referencia, generalmente un cilindro con valores de diámetro y altura iguales a los del árbol (Pardé, 1961, cit. por Rodríguez, 2005). Existen diferentes clasificaciones para los coeficientes mórficos: (1) en función de la sección empleada para calcular el volumen del cilindro de referencia, que puede ser una sección fija (generalmente referida a la secciones normal o basal) o una sección relativa, no fija (habitualmente referida a un

porcentaje de la altura total o altura maderable del árbol); y (2) en función del volumen del tronco que se pretenda estimar, que puede ser volumen total (con y sin corteza) o volumen maderable (con y sin corteza). Dadas las diferentes posibilidades existentes para la utilización de este índice, resulta conveniente indicar la sección y el volumen empleados para su definición. Cabe destacar que los coeficientes mórficos referidos a secciones fijas, de acuerdo con la primera clasificación expuesta, presentan el inconveniente de que árboles con igual forma pueden dar valores diferentes, y por el contrario, árboles con distinta forma pueden tener el mismo valor del coeficiente mórfico. Este problema, sin embargo, no se presenta en los coeficientes mórficos referidos a secciones relativas (conocidos también como coeficientes mórficos naturales o verdaderos), entre los que destaca el coeficiente mórfico de Hohenadl, que considera como diámetro del cilindro de referencia aquel que se sitúa a un 10% de la altura total del árbol (Diéguez-Aranda *et al.*, 2003).

El **cociente de forma** se define como el cociente entre dos diámetros medidos a alturas diferentes del tronco (un diámetro de referencia y otro diámetro medido habitualmente, aunque no necesariamente, a una altura superior). Este parámetro permite explicar la forma del fuste determinando la disminución de las secciones transversales a lo largo del tronco (Diéguez-Aranda *et al.*, 2003). Su clasificación se basa generalmente en la situación del diámetro de referencia, pudiendo distinguir entre cocientes de forma artificiales, cuando este diámetro se encuentra a una altura fija del tronco, o cocientes de forma naturales, cuando se sitúa a una altura relativa (expresada como un porcentaje de la altura total del árbol). La estimación de los cocientes de forma aporta una información muy valiosa para la determinación del volumen del árbol, la calidad y el precio del fuste. En este sentido, es importante apuntar que el uso de los cocientes de forma artificiales para la estimación del volumen del árbol puede presentar ciertas anomalías como consecuencia del diferente peso de la sección en función de la altura total del árbol. Este inconveniente queda solventado con el uso de los cocientes de forma naturales, en los que el tronco es dividido en un número fijo de trozas, que no dependen de la altura total del árbol. Entre todos los parámetros de este tipo, las series de cocientes de forma definidas por Hohenadl en 1936 han sido los más utilizados hasta el momento (Diéguez-Aranda *et al.*, 2003).

Las **funciones de perfil** son los modelos más ampliamente utilizados en el ámbito forestal para explicar la forma y perfil del tronco de un árbol, a pesar de que, tal y como se apuntó al principio de este capítulo, se trata de conceptos diferentes. Este tipo de ecuaciones, que fueron inicialmente introducidas por Höjer en 1903 (cit. por Behre, 1923), han sido cada vez más utilizadas para la caracterización del fuste de las diferentes especies forestales (p.e. Biging, 1984; Kozak, 1988; Newham, 1992; Riemer *et al.*, 1995; Bi, 2000; Fang *et al.*, 2000; Kozak, 2004). Esto se ha debido especialmente a la importancia que han ido adquiriendo como herramientas de

gestión, capaces de estimar características básicas de los árboles como (Prodan *et al.*, 1997): (1) diámetros a cualquier altura del tronco; (2) altura del tronco a la que se localiza un cierto diámetro; y (3) volumen entre dos diámetros o alturas del tronco, o volumen hasta un diámetro o altura límite de utilización. Esta última característica ha sido destacada desde un principio (p.e. Newham, 1988; Real y Moore, 1986) como la más importante de todas, al permitir generar tarifas de cubicación con clasificación de productos.

Las funciones de perfil son ecuaciones matemáticas que relacionan el diámetro o el radio del tronco con la altura a la que se alcanza dicho diámetro o radio (Diéguez-Aranda *et al.*, 2003). De acuerdo con esta definición, puede deducirse que los tipos dendrométricos son realmente funciones de perfil sencillas, definidas bajo un criterio más rígido que las actuales funciones de perfil, cuya formulación matemática ha sido cada vez más compleja, gracias a la potencialidad de los programas informáticos y estadísticos existentes hoy en día (Diéguez-Aranda *et al.*, 2003), y cuya precisión en la definición de la forma del tronco ha sido ampliamente mejorada.

Tal y como apuntan Diéguez-Aranda *et al.* (2003) y Castedo-Dorado (2004), en una primera aproximación, las funciones de perfil se pueden clasificar en absolutas (ecuaciones que definen la disminución del diámetro del tronco con el incremento en altura del árbol desde la base hasta el ápice) o relativas (ecuaciones que relacionan el diámetro o radio relativo del tronco con la altura relativa a la que se alcanza dicho diámetro). Éstas últimas surgen tras la necesidad de aplicar las funciones de perfil a todos los árboles de una masa forestal mediante expresiones matemáticas que sean independientes de su tamaño (Prieto y Tolosana, 1991), lo que implica el empleo de las dimensiones características del árbol en términos relativos. El diámetro relativo (d_j/d) es el cociente entre cualquier diámetro (d_j) y un diámetro de referencia (habitualmente el diámetro normal, d), y la altura relativa (h_j/h) es el cociente entre la altura a la que se alcanza un cierto diámetro d_j (h_j) y la altura total del árbol (h).

Los valores de los diámetros relativos a alturas relativas a lo largo del tronco no varían de forma significativa, independientemente del tamaño del árbol (Diéguez-Aranda *et al.*, 2003), por lo que dentro de una misma especie es esperable que la forma de los troncos tenga cierta similitud entre árboles de diferentes alturas (Demaerschalk y Kozak, 1977; Laasasenaho, 1982), razón por la que se ha venido empleando la altura relativa como variable independiente.

En algunas funciones de perfil se utilizan otras variables diferentes a las anteriormente citadas, con el fin de condicionar a las ecuaciones para obtener una mayor precisión de las estimaciones. Algunas de las transformaciones más habituales de la altura relativa son $((h_j/h)-1)$, que condiciona a la función a que estime un diámetro $d_j = 0$ cuando $h_j = h$; $(h-h_j/h-1,30)$, para forzar a que $d_j = d$

cuando $h_j = 1,30$; o el cociente $(h - h_j/h)$. Resultan también comunes las transformaciones del diámetro relativo (d_j/d) , que consiguen homogeneizar la varianza a lo largo de toda la altura del tronco (Bruce *et al.*, 1968; Kozak *et al.*, 1969; Real y Moore, 1986), y la misma elevada al cuadrado $(d_j/d)^2$, que ha resultado adecuada para la estimación del volumen del árbol a partir de funciones de perfil (Castedo-Dorado, 2004).

Además de la distinción anterior, es posible encontrar en la bibliografía diversas categorías asignadas a los diferentes tipos de funciones de perfil, en base al criterio de clasificación utilizado. De manera general, las funciones de perfil han sido diferenciadas por su complejidad (Kozak, 1988), su compatibilidad con tarifas de cubicación para la estimación del volumen (Byrne y Reed, 1986; Prieto y Tolosana, 1991), su origen (Fang y Bailey, 1999) o la expresión matemática que las define (Castedo-Dorado y Álvarez-González, 2000).

Teniendo en cuenta esta última clasificación, se han considerado siete categorías: modelos polinómicos simples, modelos polinómicos segmentados, modelos potenciales, modelos exponenciales, modelos de exponente variable, modelos trigonométricos y modelos logarítmicos. Los **modelos simples** fueron los primeros utilizados para definir el perfil del fuste, empleando una única ecuación, generalmente polinomios de grado bajo, para todo el tronco del árbol. Estas ecuaciones, que resultan fáciles de utilizar, han mostrado algunas limitaciones importantes en su estimación, destacando la descripción poco precisa de la variación del diámetro en la zona basal del tronco (Prodan *et al.*, 1997) o la tendencia a subestimar los valores de los diámetros (Castedo-Dorado, 2004). Como ejemplos de funciones de perfil simples se pueden citar las de Bruce *et al.* (1968), Kozak (1969), Kozak *et al.* (1969), Bennet y Swindell (1972), Cervera (1973), Ormerod (1973), Goulding y Murray (1976), Laasasenaho (1982), Amidon (1984), Reed y Byrne (1985), Sharma y Oderwald (2001) y Sharma *et al.* (2002). La necesidad de mejorar la caracterización del perfil del tronco en la zona basal, en donde se acumula una parte importante del volumen del árbol (Cao *et al.*, 1980), llevó al desarrollo de **modelos segmentados**, que consideran tres zonas diferenciadas del tronco, asimiladas a las formas geométricas de neiloide (en la troza basal), paraboloide (en las trozas intermedias) y cono (en el raberón) (Husch *et al.*, 1982). Para la definición de este tipo de modelos resulta necesario buscar la formulación matemática que permita unir los puntos que separan cada una de las diferentes partes del tronco, definidas por funciones polinómicas, para lo que se imponen condiciones de continuidad de la curva y de sus dos primeras derivadas (Novo *et al.*, 2003). Ejemplos de funciones de perfil segmentadas son las desarrolladas por Max y Burkhart (1976), Demaerschalk y Kozak (1977), Cao *et al.* (1980), Parresol *et al.* (1987), Fang *et al.* (2000) y Roda (2001). Otro tipo de modelos desarrollados para la descripción de las funciones de perfil, compatibles con las tarifas de cubicación

clásicas, y definidos por una única ecuación, son los **modelos potenciales**. En estos modelos simples, el diámetro relativo es una función de la altura o altura relativa elevada a un parámetro constante. Ejemplos de este tipo de modelos son los de Demaerschalk (1972; 1973), Ormerod (1973), Forslund (1990), Newham (1990) y Fang y Bailey I, II, III y IV (1999). Han sido definidos también **modelos exponenciales** que, como su propio nombre indica, incluyen términos exponenciales en su expresión matemática, en los que se incluye como variable independiente la altura total (h). Uno de los modelos de este tipo más utilizado es el de Riemer *et al.* (1995). En 1988, Kozak introdujo un tipo de **modelos de exponente variable** que definen el perfil mediante una única función con un exponente que varía a lo largo de la longitud del tronco, adaptándose a las diferentes formas que éste puede presentar a lo largo de su altura (neiloide, paraboloides, cono e intermedias entre éstas). El exponente en este tipo de modelos es realmente una función de altura (Forslund, 1990). Entre las funciones de exponente variable se pueden citar las elaboradas por Kozak (1988; 1997; 2004), Pérez *et al.* (1990), Newham (1988; 1992), Torrubiano (1994) y Muhairwe (1999). A raíz de los modelos anteriores, y partiendo de modelos basados en funciones trigonométricas, Bi definió en el año 2000 un **modelo trigonométrico** de exponente variable, en donde la base de la función se desarrolla a partir de una ecuación de volumen porcentual, con una razón entre logaritmos de dos funciones trigonométricas, y un exponente con variables que consideran el cambio en la forma a lo largo del tronco y los cambios en el tamaño del árbol, proporcionándole así una gran flexibilidad a la función. Además del modelo de Bi (2000), otra de las funciones trigonométricas que cabe destacar es la de Thomas y Parresol (1991). Por último, los **modelos logarítmicos** pueden estar definidos por funciones más o menos complejas, a menudo polinómicas, en las que aparecen como variables independientes los logaritmos de las alturas relativas, en ocasiones modificadas o sujetas a otras transformaciones adicionales (Novo *et al.*, 2003). Entre los modelos más empleados destacan el de Laasasenaho (1982) y el de Biging (1984).

Independientemente de la clasificación utilizada, las funciones de perfil han sido ampliamente elegidas como herramienta de cubicación forestal y de determinación de la forma del árbol para una gran variedad de especies, principalmente coníferas, a nivel mundial (*Pinus cooperi* Blanco, *Pinus durangensis* Martínez, *Pinus engelmannii* Carr., *Pinus leiophylla* Schl. et Cham. y *Pinus herrerae* Martínez en México (Corral-Rivas, 1999; 2007); *Pinus ponderosa* (Dougl.) Laws. y *Pinus taeda* L. en Argentina (Andenmatten *et al.*, 2002); *Picea sitchensis* (Bong.) Carr. y *Pinus sylvestris* L. en el Reino Unido (Fonweban *et al.*, 2011), entre otros).

En España, y en concreto en el noroeste peninsular, han sido definidas funciones de perfil para la mayoría de las especies coníferas y frondosas de interés (*Betula alba* L. (Gómez-García, 2009; 2011), *Eucalyptus globulus* Labill. (Sánchez *et al.*,

2004), *Eucalyptus nitens* H. (Deane & Maiden) Maiden (Pérez-Cruzado, 2009), *Pinus pinaster* Ait. (Rojo *et al.*, 2005; Arias, 2009), *Pinus radiata* D. Don (Castedo-Dorado y Álvarez-González, 2000; Castedo-Dorado, 2004; Castedo-Dorado *et al.*, 2007b; Canga, 2008), *Pinus sylvestris* (Novo *et al.*, 2003; Diéguez-Aranda, 2004; Diéguez-Aranda *et al.*, 2006), *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco (López-Sánchez, 2009) y *Quercus robur* L. (Barrio-Anta *et al.*, 2007)). Para el caso concreto de las principales coníferas productivas, en esta zona del territorio peninsular, se han probado todo tipo de modelos, desde los más sencillos de formulación polinómica hasta los más complejos de exponente variable, incluyendo también los modelos segmentados. De todos ellos, han sido seleccionados el modelo de Fang *et al.* (2000), basado en un modelo segmentado, para describir el perfil del fuste de *Pinus radiata* (Castedo-Dorado, 2004; Castedo-Dorado *et al.*, 2007b) y *Pinus sylvestris* (Diéguez-Aranda, 2004; Diéguez-Aranda *et al.*, 2006) en Galicia, y el modelo de exponente variable de Kozak (2004), para *Pinus pinaster* en esa misma región (Rojo *et al.*, 2005). Ambos modelos mostraron también un buen comportamiento en estudios recientes con *Pinus radiata* (Canga, 2008) y *Pinus pinaster* (Arias, 2009) en Asturias.

La mayoría de las funciones desarrolladas en este ámbito forestal han sido definidas para una especie determinada y no han considerado posibles diferencias en el perfil del tronco asociadas a intervenciones selvícolas (Canga, 2008). Sin embargo, y tal y como se comentó al principio del capítulo, resulta clave para la gestión forestal el conocimiento de la influencia que la selvicultura puede tener sobre la forma y perfil del fuste y, consecuentemente, sobre el valor de la madera producida. En este sentido, las podas y las claras son las actividades selvícolas más influyentes en la calidad de ese producto final y serán, por lo tanto, dos de las actividades de mayor interés en el estudio de la forma del tronco. La realización de ambas actuaciones selvícolas persigue, en términos generales, la limitación de los defectos del fuste en la zona central del mismo y la formación de una mayor cantidad de madera de calidad alrededor de ese centro defectuoso. Las funciones de perfil desarrolladas habitualmente permiten definir perfiles “ideales” del tronco, que no consideran para su determinación los defectos o anomalías presentes en el mismo y, por consiguiente, no permiten definir el centro defectuoso del árbol o determinar la cantidad de madera de calidad que se obtendrá en el momento de la corta final.

Con estos precedentes, y partiendo del objetivo principal de la tesis de analizar el efecto de la poda en el desarrollo de masas regulares de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster*, gestionadas para la producción de madera libre de nudos, el **objetivo general** del presente capítulo ha sido analizar el perfil y la forma del centro con defectos del fuste podado de ambas coníferas, a partir de mediciones de diámetros sobre verticilos a diferentes alturas del tronco. Para ello, se ha planteado la utilización de algunas de las principales metodologías que permiten la definición de

la forma y perfil externo del tronco (funciones de perfil y coeficiente de forma), seleccionando procedimientos sencillos que ayuden a comprender la influencia de la especie y/o la intensidad de poda en la forma y perfil del centro defectuoso. Por otra parte, se ha planteado como **objetivo específico** del trabajo la determinación de una ecuación que permita predecir, de forma sencilla, el perfil del fuste con defectos a partir de las ecuaciones obtenidas en esta tesis y de las funciones de perfil sin defectos definidas recientemente en Asturias para *Pinus radiata* (Canga, 2008) y *Pinus pinaster* (Arias, 2009).

4.2. Material y métodos

4.2.1. Datos empleados

Para el estudio del perfil y la forma del centro nudoso en árboles podados de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* fueron utilizados datos de diámetros sobre muñón tomados a diferentes alturas (DSM_j) en los ensayos pertenecientes a la red de parcelas de investigación de podas y claras del SERIDA, cuyas características se encuentran detalladas en el capítulo 2 y en el anexo de esta memoria.

Las mediciones fueron realizadas, mediante métodos no destructivos, en tres momentos diferentes. El primer inventario fue efectuado tras la instalación y ejecución de la primera poda (invierno 2005-2006), el segundo inventario tuvo lugar tres años después del tratamiento (invierno 2008-2009) y el tercer inventario se llevó a cabo cuatro años después de la intervención (invierno 2009-2010).

La muestra empleada en este trabajo estuvo conformada por árboles centrales de las subparcelas de poda, en los que se hubieran eliminado verticilos vivos y, por lo tanto, tuviesen una parte del fuste podado que pudiese ser caracterizada para la definición de su centro defectuoso. En estos árboles se midieron las variables dendrométricas de diámetro normal (d) y altura total (h), y los diámetros sobre muñón situados en el primer verticilo podado (DSM_i , diámetro sobre muñón inicial), último verticilo podado (DSM_f , diámetro sobre muñón final), y el verticilo podado de mayor diámetro (DSM_m , diámetro máximo sobre muñón), así como la alturas a las que se encontraban dichos diámetros (h_{DSM_j} , h_{DSM_f} , h_{DSM_m}) (Figura 4.1). La caracterización del verticilo podado de mayor diámetro (DSM_m y h_{DSM_m}) no pudo realizarse en todas las parcelas de ensayo para cada inventario. En el primer y tercer inventario se realizó su medición en tan solo una parcela de cada especie (monte de La Campa para *Pinus radiata* y monte de Valsera para *Pinus pinaster*), mientras que en el segundo inventario su medición se llevó a cabo en todos los sitios de ensayo. Al tomar los datos de campo mediante métodos no destructivos todos los diámetros fueron medidos con corteza.

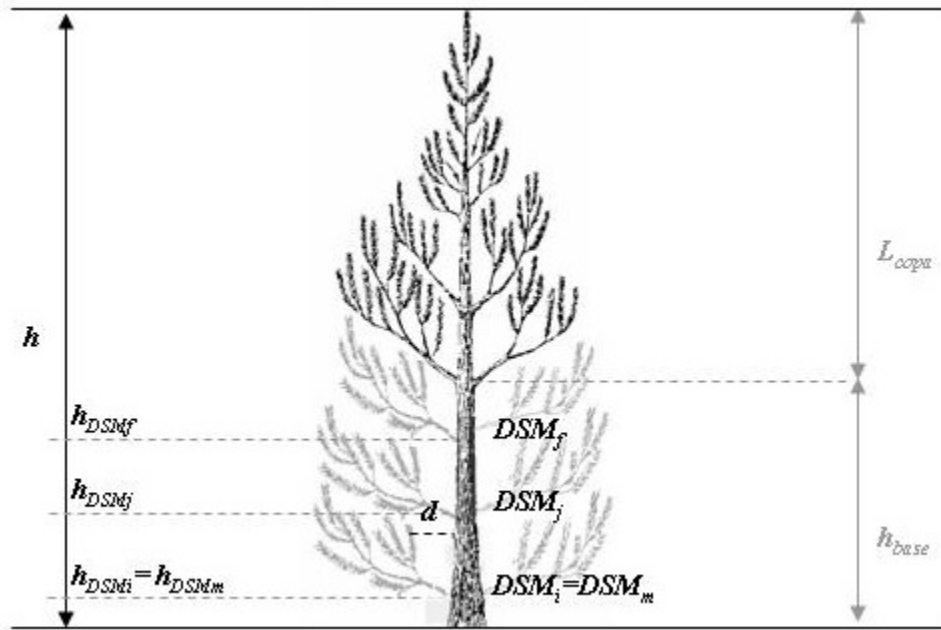


Figura 4.1. Localización de las variables medidas en el fuste podado de los árboles de la muestra.

La medición de los diámetros y alturas comentadas suponía, a priori, generar cuatro pares de valores diámetro-altura por árbol, de los que tan solo tres se corresponderían con diámetros medidos sobre muñón (siendo el otro par de valores el correspondiente con el diámetro normal, medido sin considerar verticilos podados, d y la altura total, h). Sin embargo, tal y como se pudo observar tras la realización de los dos primeros inventarios, resulta bastante frecuente que el verticilo podado de mayor diámetro (DSM_m) se encuentre en la zona basal del fuste y coincida con el primero de los verticilos podados (DSM_i). En ese caso, la muestra obtenida por árbol se reduciría a tres pares de valores diámetro-altura, siendo solamente dos los diámetros medidos sobre verticilo. Esto supone una limitación importante para la correcta definición de la forma y perfil del centro defectuoso. Por esta razón, en el tercer inventario, se planteó la necesidad de ampliar la base de datos midiendo un mayor número de verticilos en cada fuste podado. Para ello, se midió el diámetro sobre muñón en algunos verticilos (DSM_j) situados entre el primer y último verticilo podados (DSM_i y DSM_f), y la altura a la que se encontraban estos verticilos intermedios (h_{DSM_j}). Estas mediciones fueron realizadas en una submuestra de árboles de las dos parcelas seleccionadas con este fin (monte de La Campa para *Pinus radiata* y monte de Valsera para *Pinus pinaster*). La mayor altura de poda alcanzada en la parcela de *Pinus radiata* en la primera fase del ensayo hizo que el tamaño muestral de esta especie fuese bastante superior al obtenido para *Pinus pinaster*.

En los dos primeros inventarios los diámetros (d , DSM_m , DSM_i , DSM_j y DSM_f) fueron tomados con dos mediciones en cruz, mediante forcípula, de precisión milimétrica. La altura total (h) fue obtenida con hipsómetro digital Vertex III, de

precisión decimétrica, mientras que las alturas de ocurrencia de los diámetros (h_{DSMm} , h_{DSMi} , h_{DSMj} y h_{DSMf}) fueron determinadas mediante una pértiga telescópica o teodolito graduado situado verticalmente al lado del árbol, en los verticilos de la zona inferior del fuste, y Vertex III en los verticilos que se encontraban a mayor altura. En el tercer inventario fue empleado un dendrómetro electrónico Criterion RD1000 para las mediciones de los diámetros sobre verticilo. Las alturas de ocurrencia de estos diámetros y la distancia comprendida entre el dendrómetro y el árbol fueron tomadas utilizando un hipsómetro digital Vertex IV. De esta manera, las distancias fueron incorporadas manualmente en el dendrómetro con anterioridad a la medición de los diámetros de cada árbol. Los diámetros normales fueron medidos igualmente con forcípula, pudiendo comprobar así la correcta medición realizada por el Criterion RD1000. En todos los inventarios fueron anotadas las observaciones que se consideraron oportunas para cada individuo medido, de cara a facilitar la posterior localización e interpretación de posibles datos atípicos.

Los diámetros sobre muñón medidos, en los casos en los que ya se había producido la cicatrización de las heridas de poda, se corresponderían realmente con los diámetros sobre oclusión (*DSO*), que sólo pueden ser tomados en campo en este momento, en que las heridas de poda están cerradas y el crecimiento diametral aún no ha englobado por completo los verticilos podados.

La muestra finalmente empleada para el estudio de la forma y perfil del centro con defectos, así como para la estimación del diámetro sobre muñón a partir de funciones de perfil del tronco sin defectos, estuvo conformada únicamente por datos procedentes de los dos últimos inventarios, con el objetivo de caracterizar el centro defectuoso en los años posteriores a la poda. Para una correcta definición de este centro con defectos, no fueron utilizados los pares de valores diámetro normal-altura total, por ser un diámetro medido en una zona del fuste sin defectos. Finalmente, tan solo fueron analizados los árboles en los que se contaba con más de tres mediciones a lo largo del fuste, lo que limitó la muestra empleada a 874 árboles (277 de *Pinus pinaster* y 597 de *Pinus radiata*). Esta consideración afectó de forma más significativa a los tratamientos de poda más débiles (clasificados dentro de la severidad de poda del 15%), en los que la menor longitud del fuste podado limitó, en muchos casos, la obtención de más de tres pares de valores diámetro sobre muñón-altura, especialmente para *Pinus pinaster*.

En la Figura 4.2 se representa la distribución altura total-diámetro normal de la muestra de árboles empleada para el análisis del perfil y la forma del centro defectuoso de árboles podados en ambas especies.

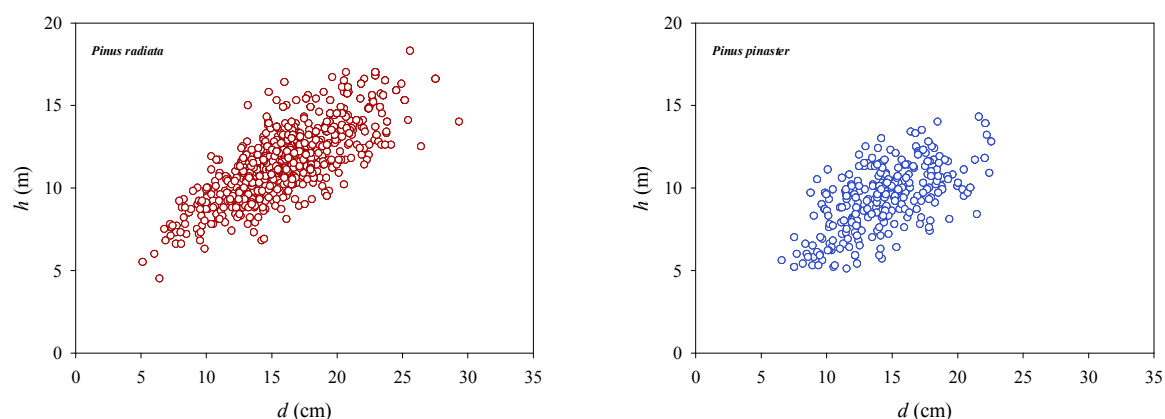


Figura 4.2. Gráficos de dispersión del diámetro normal con corteza (d , cm) y la altura total (h , m) de los 874 árboles, 597 de *Pinus radiata* (izquierda, rojo) y 277 de *Pinus pinaster* (derecha, azul), que conforman la muestra utilizada para el estudio de la forma y perfil del centro con defectos.

En la Tabla 4.1 se muestra el número de árboles y mediciones de diámetro sobre muñón utilizados en este trabajo, para cada especie, parcela de ensayo e inventario.

Tabla 4.1. Número de árboles y de mediciones de diámetro sobre muñón a diferentes alturas empleados en el estudio del perfil y la forma del centro defectuoso de árboles podados, diferenciando especie, parcela e inventario.

Especie	Parcela	Inventario	Nº árboles	Nº DSM_j
<i>Pinus radiata</i>	La Campa	invierno 2008-2009	178	712
		invierno 2009-2010	111	883
	Cabada	invierno 2008-2009	145	580
	Santa Catalina	invierno 2008-2009	100	400
	Fabal	invierno 2008-2009	63	252
<i>Pinus pinaster</i>	Valsera	invierno 2008-2009	60	240
		invierno 2009-2010	159	868
	Barcia	invierno 2008-2009	17	68
	Monteagudo	invierno 2008-2009	37	148
	Uría	invierno 2008-2009	4	16

Para determinar la posible existencia de anomalías en la base de datos habitualmente se representa y analiza de forma visual el gráfico de diámetros relativos (cociente entre el diámetro d_j a la altura h_j y el diámetro normal d ; en este caso, DSM_j/d) frente a alturas relativas (cociente entre una altura determinada, h_j , y la altura total del árbol h ; en este caso, h_{DSM_j}/h). Este tipo de gráficos permite observar la existencia de datos atípicos, que suelen ser eliminados mediante métodos sistemáticos, destacando el de Bi (2000) como el más empleado en esta primera fase de depuración. Cuando se recurre a este tipo de procedimientos sistemáticos habitualmente se parte de mediciones de diámetros del árbol tomados a distancias

fijas del tronco y en zonas del fuste sin defectos, lo que facilita la detección de los datos a eliminar, que en muchas ocasiones se corresponden con diámetros tomados en zonas del fuste cercanas a ramas o verticilos. En este estudio, sin embargo, los datos fueron tomados a distancias aleatorias del fuste, considerando los defectos del tronco debidos a ramas o verticilos, por lo que teniendo en cuenta la especial estructura y origen de los datos, se decidió realizar la depuración de la muestra de forma manual. De esta manera, fue realizada una revisión objetiva de los datos, excluyendo tan sólo aquellos valores anómalos cuyo origen estuviera asociado a errores de medición o características atípicas del árbol (bifurcaciones en zonas bajas, enfermedades, rotura del fuste o fenotipos excesivamente torcidos o inclinados), sin eliminar en ningún caso los valores correspondientes con diámetros sobre verticilos.

En la Figura 4.3 se representan los pares de valores diámetro relativo-altura relativa (una vez depurados) para cada especie. Como se puede observar, los datos sólo cubren un porcentaje de la altura total del árbol correspondiente con la zona del fuste podado. En las parcelas de *Pinus pinaster* los datos se encuentran repartidos entre la base del árbol y aproximadamente el 40% de la altura total. En *Pinus radiata*, sin embargo, se obtuvieron datos para una altura superior, entre el 40% y 60% de la altura total, al tratarse de árboles con mayor longitud de copa viva y por lo tanto mayor altura de poda.

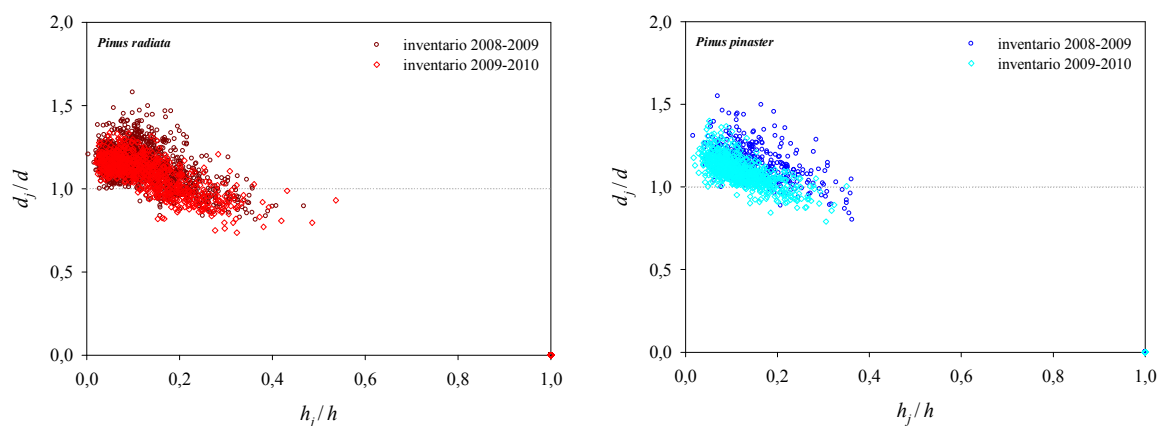


Figura 4.3. Gráficos de dispersión de los pares diámetro relativo-altura relativa de *Pinus radiata* (rojo, izquierda) y *Pinus pinaster* (azul, derecha) empleados en este estudio.

En la Tabla 4.2 se muestran los principales estadísticos descriptivos de la muestra de datos empleada.

Tabla 4.2. Estadísticos descriptivos de la muestra de árboles empleada.

Especie	Variable	Media	Mínimo	Máximo	Desv. Std.
<i>Pinus radiata</i>	Nº DSM_j /árbol	4,7	4,0	14,0	1,8
	d	15,8	5,2	29,4	3,9
	h	11,4	4,5	18,3	2,2

Tabla 4.2 (continuación). Estadísticos descriptivos de la muestra de árboles empleada.

Especie	Variable	Media	Mínimo	Máximo	Desv. Std.
<i>Pinus pinaster</i>	Nº DSM_j /árbol	4,8	4,0	8,0	1,0
	d	14,4	6,6	22,6	3,3
	h	9,4	5,1	14,3	2,0

donde Nº DSM_j es el número de diámetros medidos sobre muñón a una altura h_j , en cm; d es el diámetro normal con corteza (medido a 1,30 metros desde el suelo), en cm; h es la altura total, en m; y Desv. Std. es la desviación estándar.

4.2.2. Tratamiento y análisis de los datos

A partir de los datos mostrados en el apartado anterior, se realizó un estudio del perfil y la forma del centro con defectos del fuste podado de ambas coníferas. Todos los análisis estadísticos fueron llevados a cabo mediante la utilización del paquete estadístico SAS 9.1 (SAS Institute Inc., 2004 a;b). La representación gráfica se ha llevado a cabo mediante el programa SigmaPlot 10.0[®] (Systat Software Inc., 2006).

4.2.2.1. Perfil del centro defectuoso

4.2.2.1.1. Función de perfil definida para el fuste con defectos

Modelo analizado

Actualmente existe una gran variedad de modelos que permiten definir el perfil del fuste de las principales especies forestales. De todos ellos, los modelos de Bi (2000), Fang *et al.* (2000) y Kozak (2004) han mostrado ser las ecuaciones más adaptadas para la caracterización del fuste sin defectos de las coníferas con mayor presencia en el ámbito atlántico (Castedo-Dorado, 2004; Diéguez-Aranda, 2004; Rojo *et al.*, 2005; Diéguez-Aranda *et al.*, 2006; Castedo-Dorado *et al.* 2007b; Canga, 2008; Arias, 2009). Los dos últimos han sido utilizados para la descripción del perfil del tronco sin defectos de ambas coníferas en la región asturiana (Canga, 2008; Arias, 2009), por lo que fueron inicialmente seleccionados para caracterizar el perfil del tronco con defectos en este trabajo.

En un primer análisis, se pudo comprobar que la muestra utilizada en el presente estudio no aportaba la información necesaria para la correcta estimación del modelo de Fang *et al.* (2000). Por otro lado, el modelo de exponente variable de Kozak (2004), y la modificación propuesta por Yang *et al.* (2009), fueron descartados igualmente debido a que, a pesar de ser posible realizar su ajuste, diversos motivos llevaron a su rechazo: falta de convergencia, gran cantidad de parámetros no significativos, formas de las curvas poco fiables.

Por todo ello y dada la particular estructura de los datos empleados en este estudio (diámetros sobre muñón, medidos en número y distancia diferentes para cada árbol), así como el reducido tamaño de la muestra, se decidió la utilización de ecuaciones más simples, que permitiesen una correcta descripción del centro defectuoso de ambas especies. Así, finalmente, se optó por el empleo de un modelo sencillo, que no definiese en su formulación matemática la altura normal del árbol (1,30 metros) como un punto fijo de la ecuación, permitiendo así describir el perfil de la zona defectuosa del fuste sin obligar a la curva a pasar por el diámetro normal, cuya medición en campo no había considerado los defectos de los verticilos. De acuerdo con los requisitos comentados y sus buenos resultados para diferentes especies de coníferas (p.e. Corral-Rivas *et al.*, 1999; Pompa *et al.*, 2009), fue seleccionado el modelo compatible de Biging (1984), basado en la forma integral de la función de crecimiento de Chapman-Richards (Bertalanffy, 1949; 1957; Richards, 1959), cuya formulación matemática es:

$$d_j = d \cdot \left[b_1 + b_2 \cdot \ln \left(1 - \lambda \cdot \frac{h_j}{h} \right)^{1/3} \right], \text{ con } \lambda = 1 - \exp \left(-\frac{b_1}{b_2} \right) \quad (4.2)$$

donde d es el diámetro normal con corteza, situado a 1,30 metros sobre el suelo, en cm; d_j es el diámetro con corteza del tronco a la altura h_j , en cm; h es la altura total del árbol, en m; h_j es la altura sobre el nivel del suelo hasta el punto en el que el diámetro es d_j , en m; y b_1 y b_2 son los coeficientes a ser estimados en el modelo.

Ajuste y determinación del modelo

En un paso previo al ajuste del modelo seleccionado (Biging, 1984), se llevó a cabo una modificación de los pares de valores diámetro-altura de la punta del árbol. Esta metodología, empleada previamente en diversos trabajos (p.e. Fang *et al.*, 2000; Diéguez-Aranda *et al.*, 2006; Canga, 2008; Crecente-Campo *et al.*, 2009), permite modificar estos valores de diámetro y altura para que puedan ser incluidos en el ajuste del modelo sin que la estimación final de los parámetros se vea afectada de forma significativa (Fang *et al.*, 2000; Diéguez-Aranda *et al.*, 2006). Para ello, se basa en asignar el valor de 0,001 a los diámetros situados en la punta del árbol ($d_j = 0,001$), que dejan de ser iguales a cero ($d_j = 0$, siendo el diámetro relativo 0) y restar el valor de 0,001 a las alturas de la punta ($h_j = h - 0,001$), que dejan de ser iguales a la altura total ($h_j = h$, siendo la altura relativa 1). De esta manera, son considerados todos los pares de valores diámetro-altura del árbol en el ajuste del modelo.

La determinación del modelo se realizó en varias fases. Inicialmente, se llevó a cabo el ajuste de los datos, considerando variables ficticias (*dummy*) por especie, con el fin de determinar la posible existencia de diferencias significativas en el perfil del centro defectuoso para cada una de las coníferas estudiadas. Una vez analizado el comportamiento de las especies, se realizó el mismo procedimiento para el factor

intensidad de poda, definida por la severidad de poda clasificada en 15%, 30% y 45%. En este caso, el ajuste de los datos fue realizado con variables *dummy* para la intensidad de poda. Finalmente, de acuerdo con los resultados obtenidos en esa primera fase, considerando la especie y la intensidad de poda, fue determinado un modelo final aplicable a cada árbol de forma individual en función de la severidad de poda real de dicho árbol sin emplear clasificaciones (*hcr*). El ajuste de los modelos se realizó por mínimos cuadrados ordinarios (OLS, término en inglés “*Ordinary Least Squares*”), mediante el procedimiento MODEL del paquete estadístico SAS/ETS® (SAS Institute Inc., 2004a).

La realización de múltiples mediciones en el mismo árbol para la definición de una función de perfil da lugar a una estructura longitudinal de los datos. Esto supone la presencia de una variabilidad menor para las mediciones realizadas en cada árbol que para los diferentes individuos (Lindstrom y Bates, 1990). Este tipo de estructura de datos implica a su vez la presencia de observaciones que se encuentran correlacionadas espacialmente, lo que conlleva al incumplimiento de la suposición estadística de independencia de errores de los modelos de regresión. De las diferentes metodologías propuestas para solucionar los problemas asociados a los datos longitudinales, se ha optado por la modelización del término del error empleando una estructura autorregresiva continua (CAR(q)) adecuada para datos no equidistantes y no balanceados (Gregoire *et al.*, 1995a; Zimmerman y Núñez-Antón, 2001) (ver expresión matemática en el capítulo 2 (apartado 2.6.5.3)).

El modelo seleccionado fue evaluado sin incluir la estructura del error y, posteriormente, considerando modelos autorregresivos de diferente orden, con el fin de evaluar la corrección de la autocorrelación entre los residuos y definir el orden de la estructura del error más adecuada para el modelo propuesto. Para ello, se realizó un análisis visual de los gráficos de residuos frente a residuos con diferentes retrasos correspondientes con el ajuste del modelo para los distintos órdenes de la estructura del error considerados. Tras el análisis de los gráficos fue elegido el orden más bajo capaz de corregir parte de la autocorrelación, sin comprometer el tamaño de la muestra utilizada en este trabajo.

Evaluación del modelo

La diagnosis del modelo se basó en el análisis gráfico y numérico de los residuos. Para la evaluación gráfica de la ecuación, fueron representados los residuos obtenidos en el ajuste de la misma (diferencia entre el diámetro medido y el diámetro estimado) frente a los valores reales o predichos.

Para evaluar la capacidad de ajuste del modelo se calcularon los criterios estadísticos coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}) y raíz cuadrada del error medio cuadrático (REMC) (ver cálculo en el capítulo 2 (apartado 2.6.5.5)).

Estos estadísticos son indicativos de la bondad del ajuste del modelo para la situación actual analizada, pero no necesariamente se corresponden con la bondad de una predicción futura (Myers, 1990), para lo cual sería recomendable la validación del modelo. Considerando que no sería recomendable la división de la muestra disponible para este estudio, dado el limitado tamaño de la misma, y que el objetivo descriptivo de esta parte del trabajo no requeriría de tal procedimiento, se decidió no llevar a cabo dicha validación.

4.2.2.1.2. Estimación del diámetro sobre muñón mediante curvas de perfil del fuste sin defectos

Para la predicción del diámetro sobre muñón del fuste podado se planteó la posibilidad de estimar el perfil del fuste sin deformaciones y añadir a este perfil idealizado del tronco el engrosamiento correspondiente con los verticilos podados (Figura 4.4). Este procedimiento permitiría utilizar las funciones de perfil construidas habitualmente sin considerar los defectos del tronco, a partir de las cuales se puede estimar el diámetro del fuste (d_j) para cualquier altura del árbol (h_j), y añadir a ese d_j el valor del engrosamiento lateral correspondiente con la deformación del tronco y los muñones de los verticilos podados.

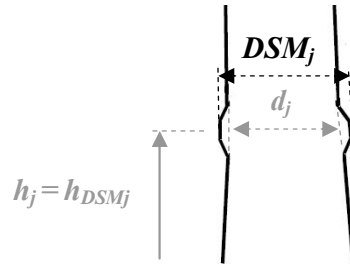


Figura 4.4. Representación de la diferencia entre el diámetro estimado (d_j) con una función de perfil, sin considerar los verticilos del árbol, y el diámetro real medido sobre muñón (DSM_j) a una altura h_j ($h_j = h_{DSMj}$) del fuste podado. Fuente: Adaptado de Andenmatten *et al.* (2002).

Para la definición del perfil del fuste sin defectos de ambas coníferas fue empleado el modelo segmentado de Fang *et al.* (2000), por su buen comportamiento en los trabajos de Canga (2008) y Arias (2009) con *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* en Asturias, respectivamente. La expresión de esta función de perfil es:

$$d_j = c_1 \cdot \sqrt{h^{(k-b_1)/b_1} \cdot (1-q)^{(k-\beta)/\beta} \cdot \alpha_1^{I_1+I_2} \cdot \alpha_2^{I_2}} \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} \Phi &= \pi/40.000 & r_0 &= (1-h_{toc}/h)^{k/b_1} & p_1 &= h_1/h & \alpha_1 &= (1-p_1)^{\frac{(b_2-b_1) \cdot k}{b_1 \cdot b_2}} \\ q &= h_j/h & r_1 &= (1-p_1)^{k/b_1} & p_2 &= h_2/h & \alpha_2 &= (1-p_2)^{\frac{(b_3-b_2) \cdot k}{b_2 \cdot b_3}} \\ \beta &= b_1^{1-(I_1+I_2)} \cdot b_2^{I_1} \cdot b_3^{I_2} & r_2 &= (1-p_2)^{k/b_2} \end{aligned}$$

$$c_1 = \sqrt{\frac{a_0 \cdot d^{a_1} \cdot h^{a_2-k/b_1}}{b_1 \cdot (r_0 - r_1) + b_2 \cdot (r_1 - \alpha_1 \cdot r_2) + b_3 \cdot \alpha_1 \cdot r_2}}$$

donde d_j es el diámetro con corteza del tronco que se alcanza a la altura h_j , en cm; d es el diámetro normal con corteza, situado a 1,30 metros sobre el suelo, en cm; h es la altura total del árbol, en m; h_j es la altura sobre el nivel del suelo hasta el punto en el que el diámetro es d_j , en m; h_{toc} es la altura del tocón, en m; I_1 e I_2 son variables *dummy*, con $I_1 = 1$ si $p_1 \leq q \leq 1$, 0 en el resto de los casos; e $I_2 = 1$ si $p_2 \leq q \leq 1$, 0 en el resto de los casos; a_0 - a_2 , b_1 - b_6 , p_1 - p son los coeficientes a ser estimados; Φ es un factor que permite transformar diámetros al cuadrado en cm² en secciones en m²; q es la altura relativa a la que se encuentra el diámetro d_j medido; p_1 y p_2 son las alturas relativas desde el suelo a las que se asume que se producen los dos puntos de unión que supone el modelo, el primero próximo a la altura normal y el segundo en una posición más elevada del tronco).

Los valores de los parámetros utilizados en este trabajo, estimados por Canga (2008) y Arias (2009) (para una altura del tocón de 0,10 metros), se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 4.3. Parámetros del modelo de Fang *et al.* (2000) obtenidos por Canga (2008) y Arias (2009) para masas de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* en Asturias.

Parámetro	<i>Pinus radiata</i>	<i>Pinus pinaster</i>
a_0	$5,955 \cdot 10^{-5}$	$6,120 \cdot 10^{-5}$
a_1	1,879	1,890
a_2	0,925	0,918
b_1	$1,310 \cdot 10^{-5}$	$9,060 \cdot 10^{-6}$
b_2	$3,336 \cdot 10^{-5}$	$3,360 \cdot 10^{-5}$
b_3	$2,983 \cdot 10^{-5}$	$3,000 \cdot 10^{-5}$
p_1	0,106	0,087
p_2	0,597	0,681

Tras la estimación del perfil del tronco sin defectos, mediante las funciones propuestas por Canga (2008) y Arias (2009) para ambas coníferas, se determinó el valor del engrosamiento del fuste debido a los verticilos de las ramas podadas (E_j). Los detalles de cálculo de este engrosamiento fueron recogidos en el capítulo 2, siendo, en términos generales, la diferencia entre el diámetro sobre muñones observado (DSM_j) a la altura h_j del árbol y el diámetro del árbol sin defectos (d_j) a esa misma altura del árbol.

$$E_j = DSM_j - d_j \quad (4.4)$$

donde E_j es el engrosamiento en el verticilo j , en cm; DSM_j es el diámetro sobre muñón en el verticilo j , medido en campo, en cm; y d_j es el diámetro sin defectos en el verticilo j , en cm, estimado mediante las funciones de perfil definidas para el fuste sin defectos de *Pinus radiata* (Canga, 2008) y *Pinus pinaster* (Arias, 2009) en Asturias, cuya expresión y valores de los parámetros han sido detallados con anterioridad (Ecuación (4.3) y Tabla 4.3, respectivamente).

Con el objetivo de evaluar el valor del engrosamiento en función de la especie y la intensidad real de poda (definida por la severidad de poda agrupada en 15%, 30% y 45%) se realizó un análisis descriptivo sencillo y se ajustó un modelo lineal que relacionase el valor del engrosamiento con el diámetro sin defectos a la misma altura del fuste. El engrosamiento fue definido por dos parámetros, uno aditivo relacionado con la especie y otro multiplicativo relacionado con la intensidad de poda, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$DSM_j = a + m \cdot d_j \quad (4.5)$$

donde DSM_j es el diámetro sobre muñón observado en el verticilo j , en cm; d_j es el diámetro sin defectos en el verticilo j , en cm, estimado mediante las funciones de perfil del fuste sin defectos de *Pinus radiata* (Canga, 2008) y *Pinus pinaster* (Arias, 2009) en Asturias; a es la ordenada de la ecuación, con un valor asociado a la especie (constante en un mismo árbol); m es la pendiente de la ecuación, con un valor asociado a la intensidad real de poda (variable en el árbol). En este modelo, existen tres fuentes principales de error: la asociada a la calidad de estimación de la función de perfil utilizada para calcular el diámetro del fuste sin deformaciones (d_j), la asociada a la estimación del engrosamiento (E_j) y la asociada al error aleatorio.

Por último, se realizó un análisis de varianza para definir la ecuación final que relacionase el valor del diámetro sobre muñón con el valor del diámetro estimado mediante las funciones de perfil, considerando los factores especie e intensidad real de poda. Este análisis se llevó a cabo mediante el procedimiento MIXED del paquete estadístico SAS/STAT[®] (SAS Institute Inc., 2004b), incluyendo el término independiente asociado a la especie, y determinando los valores de los parámetros (término independiente y pendiente) mediante mínimos cuadrados ordinarios (OLS, término en inglés “*Ordinary Least Squares*”).

4.2.2.2. Forma del fuste

Para el análisis de la influencia de la especie y del tratamiento de poda en la forma del fuste podado de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* fue determinado el coeficiente de forma. Rodríguez y Molina (2003) y Rodríguez (2005) determinaron este coeficiente para la comparación de la forma del fuste de varios clones de chopo (*Populus x euramericana*), ajustando el modelo de Bi simplificado ($d_r = B^k$, donde d_r es el diámetro relativo (d_j/d), B es la base del modelo de Bi (2000) y k es el coeficiente de forma). Pinkard y Beadle (1998b) utilizaron este coeficiente para describir la forma del fuste de *Eucalyptus nitens*, basándose en la ecuación general descrita por Newnham (1988) ($Y^k = X$, donde Y es el diámetro relativo (d_j/d), X es la relación de altura $((h-h_j)/(h-1,30))$ y k es el coeficiente de forma). Para el presente trabajo, dadas las características de la muestra empleada y la ecuación de perfil seleccionada (Biging, 1984), el coeficiente de forma fue determinado mediante el ajuste de un modelo en el que el perfil del diámetro relativo es descrito como una función de la altura relativa elevada al parámetro a estimar (coeficiente de

forma), sin considerar la altura de 1,30 metros en la que el diámetro medido no tiene en cuenta los defectos del verticilo. La expresión de esta ecuación es:

$$d_r = \left(\frac{(h - h_j)}{h} \right)^k \quad (4.6)$$

donde d_r es el diámetro relativo (DSM_j/d); DSM_j es el diámetro sobre muñón en el verticilo j , en cm; d es el diámetro normal, sin defectos, medido a la altura de 1,30 m, en cm; h es la altura total del árbol, en m; h_j es la altura a la que se encuentra el DSM_j , en m; y k es el coeficiente de forma.

Para la determinación de k se realizó el ajuste de la Ecuación (4.6), para cada árbol, mediante el procedimiento NLIN de SAS/STAT® (SAS Institute Inc., 2004b).

Por último, se realizó un análisis de varianza en el que el coeficiente de forma fue la variable explicativa, y la especie y la intensidad real de poda (definida por la severidad de poda agrupada en 15%, 30% y 45%) fueron definidos como factores. Este análisis se llevó a cabo mediante el procedimiento MIXED del paquete estadístico SAS/STAT® (SAS Institute Inc., 2004b).

4.3. Resultados y discusión

4.3.1. Perfil del centro defectuoso

4.3.1.1. Función de perfil definida para el fuste con defectos

Inicialmente, el ajuste de un modelo con variables *dummy* por especie no mostró diferencias significativas entre *Pinus radiata* y *Pinus pinaster*. Por ello, se ajustó un único modelo para ambas especies introduciendo variables *dummy* para la intensidad real de poda, definida a través de la severidad de poda, clasificada en 15%, 30% y 45%. En este ajuste, fueron observadas diferencias significativas entre las tres intensidades de poda consideradas.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis anterior, fue ajustado un único modelo, en base a la expresión matemática de Biging (1984), para ambas especies, incluyendo el factor poda como la altura de copa relativa aplicada a cada árbol de forma individual (hcr). El término de poda fue incluido en la ecuación acompañando a los dos parámetros del modelo (Ecuación (4.7)), cuya estimación resultó significativa a un nivel del 5% (Tabla 4.5).

Una vez seleccionado el modelo definitivo, se llevó a cabo su ajuste sin expandir el término del error CAR(0), y expandiendo dicho término mediante un modelo autorregresivo continuo de primer y segundo orden (CAR(1) y CAR(2), respectivamente). A pesar de que la mayor corrección de la autocorrelación se producía para la estructura de error CAR(2), el limitado tamaño de la muestra

utilizada recomendó el empleo de la estructura CAR(1). En cualquier caso, y tal y como se recoge en la Tabla 4.4, la estructura (CAR(1)) presentó valores del estadístico de Durbin-Watson (DW) dentro de los intervalos aceptados en las tablas para rechazar la existencia de autocorrelación entre los residuos con un $\alpha = 0,05$ (Durbin y Watson, 1951).

Tabla 4.4. Estadístico de Durbin-Watson (DW) en función del orden de la estructura de autocorrelación autoregresiva continua.

Modelo	CAR(0)	CAR(1)	CAR(2)
Biging (1984)	1,28	1,88	1,99

donde CAR(0) se corresponde con el ajuste sin estructura autoregresiva, y CAR(1) y CAR(2) son las estructuras autoregresivas de primer y segundo orden incluidas en el ajuste del modelo seleccionado.

En la Figura 4.5 se muestran los gráficos de residuos frente a residuos de una y dos observaciones anteriores dentro del mismo árbol (1^a y 2^a columna respectivamente), sin corregir la autocorrelación, con CAR(0) (1^a fila), y corrigiendo la autocorrelación con CAR(1) (2^a fila).

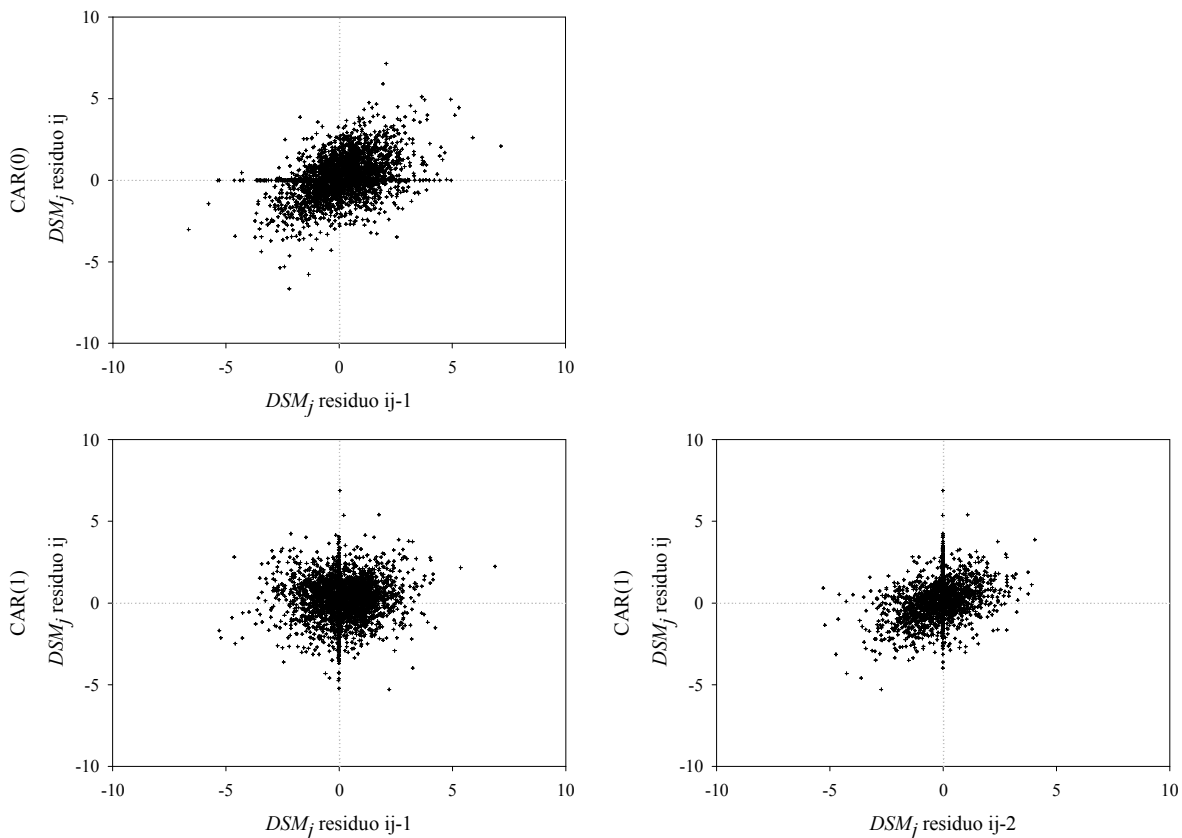


Figura 4.5. Gráficos de residuos frente a residuos con un retraso (1^a columna) y residuos con dos retrasos (2^a columna) dentro del mismo árbol para el modelo final de Biging (1984), en ambas coníferas, incluyendo el término de poda, sin considerar la autocorrelación (1^a fila), y expandiendo el término del error con una estructura autorregresiva continua de orden 1 (2^a fila).

En la Tabla 4.5 se presentan los valores de los parámetros estimados para el modelo de Biging (1984), para ambas coníferas, considerando la intensidad de poda y una estructura de error continua autorregresiva de primer orden (CAR(1)), así como los estadísticos de bondad de ajuste analizados. Los valores de los estadísticos resultantes tras el ajuste de la ecuación fueron inferiores a los obtenidos recientemente con las funciones de Fang *et al.* (2000) y Kozak (2004) en ambas especies en el arco atlántico. No obstante, considerando la estructura de los datos utilizados (diámetro sobre verticilo medido a diferentes alturas para cada árbol) y el limitado tamaño de la muestra, los valores de los estadísticos obtenidos pueden considerarse adecuados para este trabajo (R^2_{adj} de 0,981 y $REMC$ de 1,102 cm). Estos valores fueron inferiores a los encontrados inicialmente por Biging (1984), para seis especies de coníferas del norte de California (R^2_{adj} de 0,989 a 0,991). Sin embargo, fueron superiores a los obtenidos con esta ecuación por Novo *et al.* (2003) para *Pinus sylvestris* en Galicia (R^2_{adj} de 0,972 y $REMC$ de 1,549), Corral-Rivas *et al.* (1999) para cinco especies de pino en México (R^2_{adj} de 0,962) o Pompa *et al.* (2009) para *Pinus arizonica* Engelm. en ese mismo país (R^2_{adj} de 0,970 y $REMC$ de 2,921).

Tabla 4.5. Parámetros estimados y estadísticos de bondad de ajuste resultantes del ajuste del modelo de Biging (1984), incluyendo el término de poda, con una estructura de error continua autorregresiva de primer orden.

Parámetro	Estimación	Error estándar asintótico	t Valor	Prob> t	REMC	R^2_{adj}
b_1	1,223244	0,0181	67,55	<0,0001	1,102	0,9809
b_{10}	0,299284	0,0632	4,74	<0,0001		
b_2	0,186889	0,0299	6,24	<0,0001		
b_{20}	0,447091	0,0994	4,5	<0,0001		
ρ_1	0,153409	0,0163	9,4	<0,0001		

donde Prob>|t| es el valor de significación del parámetro; $REMC$ es la raíz cuadrada del error medio cuadrático, en cm; R^2_{adj} es el coeficiente de determinación ajustado; y b_i son los parámetros del modelo de Biging (1984) estimados; y ρ_1 es el parámetro de autocorrelación.

La ecuación propuesta en este estudio inicial para explicar el perfil del centro nudoso en masas regulares de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* de Asturias, es:

$$DSM_j = d \cdot \left[(1,22324 + 0,29928 \cdot hcr) + (0,18689 + 0,44709 \cdot hcr) \cdot \ln \left(1 - \lambda \cdot \frac{h_j}{h} \right)^{1/3} \right] \text{ con } \quad (4.7)$$

$$\lambda = 1 - \exp \left(- \frac{(1,22324 + 0,29928 \cdot hcr)}{(0,18689 + 0,44709 \cdot hcr)} \right)$$

donde DSM_j es el diámetro sobre muñón a la altura h_j , en cm; d es el diámetro normal con corteza, situado a 1,30 metros sobre el suelo, en cm; h es la altura total del árbol, en m; h_j es la altura sobre el nivel del suelo hasta el verticilo en el que el diámetro es d_j , en m; y hcr es la altura de copa relativa correspondiente con la severidad real de poda aplicada en cada árbol de forma individual.

En la Figura 4.6 se muestran los gráficos de los valores estimados por la función modificada de Biging (1984) y los valores observados, así como los gráficos de valores estimados frente a sus residuos. Se observa una buena precisión en las estimaciones, a pesar de presentarse una ligera tendencia en la distribución de los residuos del modelo.

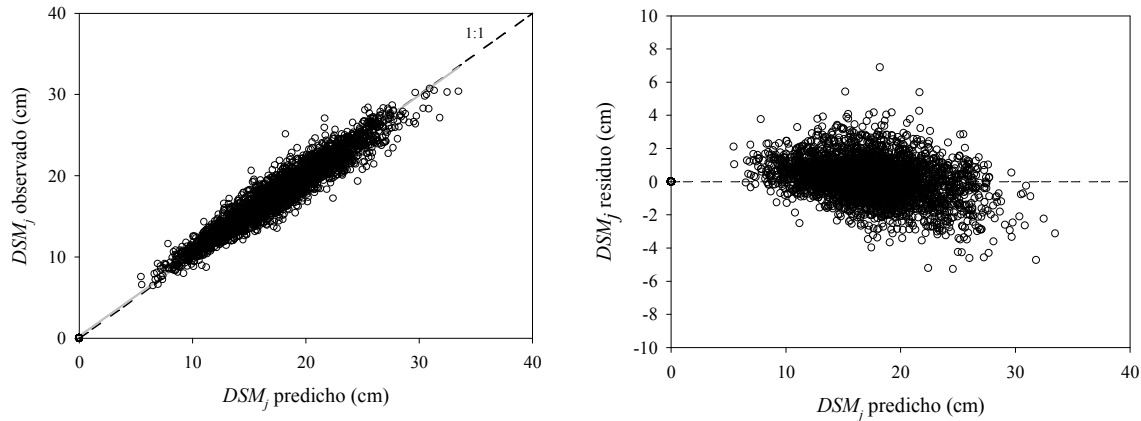


Figura 4.6. Gráfico de valores observados frente a valores predichos (izquierda) y de residuos frente a predichos (derecha) para el modelo de Biging (1984), para ambas coníferas, incluyendo el término de poda y expandiendo el término del error con una estructura autorregresiva continua de primer orden.

El tipo de ecuación propuesto en este trabajo permite al gestor forestal estimar el perfil del centro defectuoso del fuste podado a partir de variables dendrométricas fáciles de medir en campo (diámetro normal, altura total y altura de copa). La sencillez de la formulación del modelo de Biging (1984) fue apuntada como una ventaja por Corral-Rivas *et al.* (1999), quienes afirmaron que la mejor adaptación de esta ecuación en las clases diamétricas extremas de diferentes especies de pino se debía a su ecuación, con tan solo dos parámetros y una variable, en comparación con otros modelos que presentaban una mayor cantidad de parámetros estadísticos (p.e. Clutter, 1980; Amidon, 1984; Kozak, 1988; Rustagi y Loveless, 1991; Newham, 1992).

El modelo de Biging (1984) presenta también la ventaja de ser integrable y permitir la estimación del volumen total o parcial del fuste. Por otro lado, Corral-Rivas *et al.* (1999) y Pompa *et al.* (2009) comentan que la función de Biging (1984) simula satisfactoriamente el perfil en la mayor parte del fuste, aunque disminuye su consistencia en la punta, donde el perfil es más difícil de modelizar por factores asociados con el tamaño de la copa. Sin embargo, este inconveniente no supone un problema en este trabajo, al tratar de modelizar tan solo la zona del fuste podado.

La utilización de las funciones aquí presentadas tras el cierre total de las heridas de poda permitirá definir el volumen del árbol que estará conformado por madera de calidad (libre de defectos) y aquel que contendrá nudos. De acuerdo con esto, la utilización conjunta de las funciones de perfil definidas habitualmente, sin

considerar defectos, y las funciones de perfil aquí planteadas, considerando los defectos de los verticilos podados, permitiría realizar una diferenciación del fuste por calidades en función de la proporción del tronco conformada por madera de buena y mala calidad.

En el futuro, con la obtención de una mayor cantidad de datos, se podrán evaluar otras ecuaciones que han mostrado en los últimos estudios desarrollados mejorar las estimaciones efectuadas para coníferas en el noroeste de España, de forma que se puedan valorar un mayor número de opciones para definir finalmente una ecuación que permita establecer un equilibrio entre precisión y sencillez.

4.3.1.2. Estimación del diámetro sobre muñones mediante curvas de perfil del fuste sin defectos

Tras la estimación del perfil del tronco sin defectos, mediante las funciones propuestas por Canga (2008) y Arias (2009) para *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* en Asturias, respectivamente, fueron determinados los valores del engrosamiento del fuste (E_j) como la diferencia entre el diámetro del árbol estimado sin defectos (d_j) a partir de dichas funciones de perfil (Canga, 2008; Arias, 2009), y el diámetro sobre muñones observado (DSM_j) a la altura h_j (h_{DSM_j}) del árbol. Los valores de engrosamiento obtenidos fueron representados de forma gráfica frente a los valores de diámetro sobre muñón observados (Figura 4.7, izquierda). Con ello, se pudo apreciar cierta tendencia en el engrosamiento de ambas especies, con mayores valores de esta variable para los mayores diámetros del fuste, lo que podría deberse, entre otros factores, al mayor tamaño de las ramas y al mayor crecimiento diamétrico en esas zonas del tronco. El engrosamiento de ambas especies mostró una ligera diferencia, con mayores valores para *Pinus radiata*. En ambos casos se muestra cómo estimar un perfil del fuste podado sin defectos supone una subestimación del tamaño real del tronco con defectos, cometiendo un mayor error para los diámetros de mayor valor.

Por otra parte, y tal y como se muestra en la Figura 4.7 (derecha), cuando definimos el momento de poda por el tamaño del diámetro del árbol, siempre debe ser considerada la presencia de diámetros mayores en las zonas del árbol que contienen las ramas. Se muestra además, para ambas especies, que al podar diámetros inferiores la diferencia de diámetro con y sin muñón será menor, y por lo tanto también será inferior el tamaño del centro defectuoso, haciendo patente que la poda de árboles de menor diámetro nos ayudará a optimizar el valor del producto final, siempre que la intensidad y momento de la poda efectuada no comprometan el propio crecimiento del árbol.

Los criterios de recomendación del diámetro máximo sobre muñón, para optimizar la cantidad de madera libre de nudos en *Pinus radiata* y *Pinus pinaster*,

dependiendo de los autores, oscilan entre 8 cm y 19 cm (p.e. Meyers, 1995; Rodríguez-Soalleiro *et al.*, 1997; Muñoz, 1998; Dans del Valle *et al.*, 1999; Private Forests Tasmania, 2004; Chauchard y Olalde, 2005), pudiendo incluso ser aceptables diámetros de hasta 25 cm, en árboles dominantes y con buen crecimiento, para aprovechamiento de trozas de gran diámetro (Private Forests Tasmania, 2004), con la consiguiente pérdida de madera de calidad a mayores valores de este diámetro. Tal y como se puede observar en la Figura 4.7 (izquierda), el tamaño de los diámetros sobre verticilo (DSM_j) observados para ambas especies ha estado, en su mayoría, dentro de los umbrales recomendados, aunque se debe tener en cuenta que no todos los verticilos medidos se encontraban totalmente cicatrizados, con lo que el valor del centro con defectos, en esos casos, será aun mayor. En cualquier caso, y especialmente para *Pinus radiata*, se observan algunos árboles con valores de diámetro sobre muñón excesivos, en los que no sería recomendable realizar una poda alta, para obtener más de una troza de madera de calidad, ni tampoco deberían ser seleccionados como árboles de porvenir para favorecer en una actividad de clara. Por ello, la posibilidad de estimar el tamaño y distribución del centro con defectos puede ser de gran ayuda para la optimización de las intervenciones selvícolas de una masa forestal con un fin productivo.

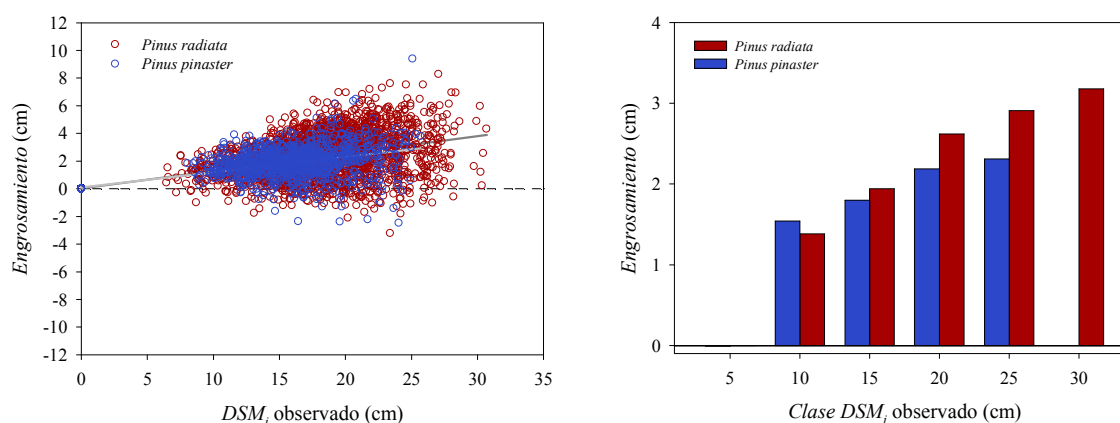


Figura 4.7. Gráfico de los valores de engrosamiento frente a los valores de diámetro sobre muñón observados (izquierda) y de valores medios del engrosamiento por clases diamétricas del diámetro sobre muñón observado (derecha), para cada especie.

La influencia de la poda en el engrosamiento ha sido otro de los factores a considerar. Tal y como se observa en la Figura 4.8, ambas especies han mostrado un mayor engrosamiento a mayor intensidad de poda. En cualquier caso, y tal y como apunta Rodríguez (2005), resulta importante el análisis combinado crecimiento-perfil para evaluar la influencia de la poda sobre especies forestales maderables, dada la alta correlación (inversa) entre ambos análisis.

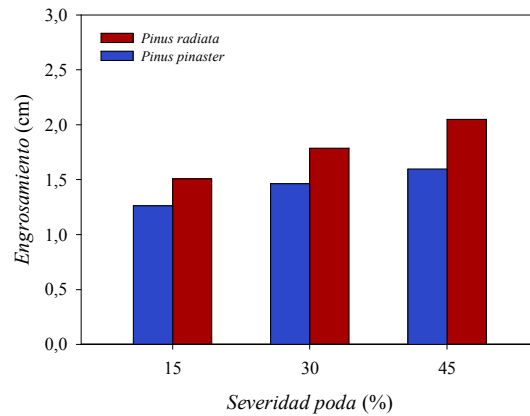


Figura 4.8. Engrosamiento medio (cm) para cada especie e intensidad de poda (severidad de poda clasificada en 15%, 30% y 45%).

En línea con los resultados obtenidos, y de acuerdo con la Ecuación (4.8), se propuso una función para la estimación del diámetro sobre muñón a una altura j sobre el nivel del suelo (DSM_j), a partir del diámetro estimado por la función de perfil de Fang *et al.* (2000) a esa altura del fuste (d_j), utilizando los parámetros propuestos por Canga (2008) para *Pinus radiata* y Arias (2009) para *Pinus pinaster* en Asturias, añadiendo a ese diámetro estimado un valor de engrosamiento constante para cada especie, así como un factor variable para cada intensidad de poda, siendo la expresión matemática final:

$$DSM_j = a_1 + a_2 \cdot I_1 + d_j \cdot (m_1 + m_2 \cdot I_2 + m_3 \cdot I_3) \quad (4.8)$$

donde DSM_j es el diámetro sobre muñón a una altura j sobre el nivel del suelo, en cm; d_j es el diámetro sin defectos estimado por la función de perfil de Fang *et al.* (2000), de acuerdo con los parámetros propuestos por Canga (2008) para *Pinus radiata* y Arias (2009) para *Pinus pinaster* en Asturias, a una altura j sobre el nivel del suelo, en cm; m_i son los valores de los engrosamientos del DSM_j en relación con el d_j ; I_1 , I_2 e I_3 son variables *dummy*, siendo $I_1 = 1$ para *Pinus pinaster*, 0 para *Pinus radiata*; $I_2 = 1$ si *Severidad poda* = 15%, 0 en el resto de los casos; $I_3 = 1$ si *Severidad poda* = 30%, 0 en el resto de los casos; a_i son los parámetros a estimar.

Los valores de los parámetros estimados tras el ajuste de la Ecuación (4.8) se recogen en la Tabla 4.6. Los estadísticos de ajuste obtenidos mostraron valores que se pueden considerar como buenos (R^2_{adj} de 0,972 y $REMC$ de 1,335 cm), dada la complejidad de la variable definida, por los diversos factores que pueden influir en su valor, así como por la reducida muestra utilizada en este trabajo.

Tabla 4.6. Valor de los parámetros y estadísticos de bondad de ajuste del modelo propuesto para la estimación del diámetro sobre muñón a partir de las curvas de perfil del fuste sin defectos de Canga (2008) para *Pinus radiata* y Arias (2009) para *Pinus pinaster*.

Parámetro	Estimación	Error estándar asintótico	t Valor	Prob> t	REMC	R^2_{adj}
a_1	0,494152	0,044339	11,14	<0,0001	1,3351	0,9720
a_2	-0,240122	0,044751	-5,37	<0,0001		

Tabla 4.6 (continuación). Valor de los parámetros y estadísticos de bondad de ajuste del modelo propuesto para la estimación del diámetro sobre muñón a partir de las curvas de perfil del fuste sin defectos de Canga (2008) para *Pinus radiata* y Arias (2009) para *Pinus pinaster*.

Parámetro	Estimación	Error estándar asintótico	t Valor	Prob> t	REMC	R^2_{adj}
m_1	1,1183782	0,003829	292,09	<0,0001		
m_2	-0,0447775	0,005860	-7,64	<0,0001		
m_3	-0,0115349	0,003382	-3,41	0,0007		

donde Prob>|t| es el valor de significación del parámetro; REMC es la raíz cuadrada del error medio cuadrático, en cm; y R^2_{adj} es el coeficiente de determinación ajustado; a_i y m_i son los parámetros estimados del modelo.

La ecuación final para la estimación del diámetro sobre muñón a partir del diámetro sin defectos estimado mediante las funciones de perfil propuestas por Canga (2008), para *Pinus radiata*, y Arias (2009), para *Pinus pinaster*, a partir del modelo segmentado de Fang *et al.* (2000), para masas podadas de ambas coníferas en Asturias, es:

$$DSM_j = 0,49415 - 0,24012 \cdot I_1 + d_j \cdot (1,11838 - 0,04478 \cdot I_2 - 0,01153 \cdot I_3) \quad (4.9)$$

donde DSM_j es el diámetro sobre muñón a una altura j sobre el nivel del suelo, en cm; d_j es el diámetro sin defectos estimado por la función de perfil de Fang *et al.* (2000) utilizada por Canga (2008) para *Pinus radiata* y por Arias (2009) para *Pinus pinaster* en Asturias, a una altura j sobre el nivel del suelo, en cm; I_1 , I_2 e I_3 son variables *dummy*, siendo $I_1 = 1$ para *Pinus pinaster*, 0 para *Pinus radiata*; $I_2 = 1$ si Severidad poda = 15%, 0 en el resto de los casos; e $I_3 = 1$ si Severidad poda = 30%, 0 en el resto de los casos.

La base metodológica propuesta en este trabajo ha sido empleada previamente por Andenmatten *et al.* (2002) para masas podadas de *Pinus taeda* en Argentina. En ese caso, los autores proponen la estimación del engrosamiento como un valor constante para la especie e intervención de poda. Sin embargo, y tal y como se ha podido comprobar en este estudio, es posible plantear una ecuación menos rígida, que considere la especie y la intervención de poda como variables explicativas del engrosamiento. Aun así, cabe destacar la necesidad de ampliar el tamaño de la muestra y estudiar la posible influencia de otros factores que no han sido considerados en este trabajo (p.e. densidad, calidad de corte, época de poda, edad, ramosidad, genética) y que podrían estar afectando al valor del engrosamiento.

A pesar de esto, a falta de estudios en el ámbito atlántico que consideren los verticilos para la definición del perfil del tronco de masas podadas, la ecuación propuesta en este trabajo podría ayudar al mayor entendimiento del perfil con defectos de ambas especies, en función de la intensidad de poda, en relación con el perfil sin defectos estimado habitualmente mediante funciones de perfil.

Un resultado destacable ha sido el análisis inicial de la influencia de la poda en el perfil del fuste de ambas especies, incorporando variables asociadas a este tratamiento selvícola en las ecuaciones seleccionadas para la descripción del centro defectuoso. Se espera que el seguimiento de los ensayos permita obtener la información necesaria para la validación de este modelo.

4.3.2. Forma del fuste

El análisis de varianza del coeficiente de forma tras el ajuste individual del modelo propuesto (Ecuación (4.6)) no resultó significativo para el factor especie. Sin embargo, la intensidad real de poda, definida por la severidad de poda agrupada en 15%, 30% y 45%, sí resultó significativa. Esta significación para el factor poda se mantuvo al considerar los inventarios dentro del análisis (Tabla 4.7). El resultado mostró una débil significación de la interacción intensidad de poda e inventario ($p = 0,415$), siendo tan solo significativas las diferencias entre la poda de menor intensidad (15%) del segundo inventario (invierno 2008-2009) y el resto de tratamientos de poda de ambos inventarios. Para cada factor por separado, la mayor forma cilíndrica fue observada en el tercer inventario (invierno 2009-2010) y en el tratamiento de poda de mayor intensidad (45%).

Tabla 4.7. Coeficiente de forma de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* en función de la severidad de poda (agrupada en 15%, 30% y 45%) y el año de medición (inviernos 2008-2009 y 2009-2010). Letras diferentes indican distintos grupos en el test de comparación de Tukey ($\alpha = 95\%$).

Inventario	Severidad poda	k
invierno 2008-2009	15	0,300 ^a
	30	0,277 ^b
	45	0,272 ^b
invierno 2009-2010	15	0,276 ^b
	30	0,277 ^b
	45	0,273 ^b

donde k es el coeficiente de forma; y *Severidad poda* es la intensidad real de poda, en %.

Las diferencias mostradas en el segundo inventario entre el tratamiento de poda más débil (15%) y las podas intermedia (30%) y fuerte (45%) dejaron de ser patentes en el tercer inventario, en donde no se observaron diferencias significativas entre intensidades de poda. Sin embargo, en ambos inventarios los perfiles con formas más cilíndricas fueron observados para la poda realizada con mayor intensidad (45%). De acuerdo con esto, los árboles más podados poseen un fuste defectuoso más cilíndrico (no significativamente más cilíndrico que la poda intermedia en el segundo inventario ni las podas débil e intermedia en el tercero). La mayor forma cilíndrica es asociada generalmente a la obtención de trozas de mayor

valor y aptitud tecnológica, con la consiguiente mejora en el rendimiento industrial, aunque deberá ser considerada también la influencia de otros factores como la rectitud del fuste.

Aunque no se conocen en la bibliografía trabajos que analicen la forma del fuste considerando los defectos de los verticilos, diversos estudios han evaluado el efecto de la poda en la forma del fuste sin defectos, encontrando una mayor forma cilíndrica en los años posteriores al tratamiento. Así, Pinkard y Beadle (1998b) observaron que la influencia de las intervenciones en *Eucalyptus nitens* había sido diferente para los distintos periodos de tiempo evaluados, siendo la poda de mayor intensidad la que daba lugar a formas más cilíndricas, aunque tan solo lo hacía de forma significativa en algunos de los periodos analizados. Otros trabajos en los que se encontró una mayor forma cilíndrica tras la realización de la poda fueron, entre otros, los de Larson (1965) para *Larix laricina* (Du Roi) K. Koch, O'Hara (1991) y De Montigny y Stearns-Smith (2001) para *Pseudotsuga menziesii*, así como Rodríguez *et al.* (2001) y Rodríguez (2005) para varios clones de chopo (*Populus x euramericana*).

Sin embargo, la mayor forma cilíndrica observada en estos trabajos fue definida para periodos de tiempo relativamente cercanos al momento de ejecución de la poda, aunque de acuerdo con diversos autores es más relevante determinar el efecto de las operaciones de poda sobre la forma del fuste en el momento de la corta. Así, por ejemplo, Sutton y Crowe (1975) y Bredenkamp *et al.* (1980), trabajando con *Pinus radiata* y *Eucalyptus grandis*, respectivamente, no encontraron cambios en la forma del fuste de árboles podados a largo plazo.

En todo caso, dados los cambios observados en la forma del fuste, esta variable puede interpretarse como una variable dinámica que cambiará a lo largo del ciclo productivo de una masa, cambios que de acuerdo con Pinkard y Beadle (1998b), serán también variables a lo largo del tronco para un momento determinado. Autores como Burkhart y Walton (1985) o Muhairwe (1994) señalan que aspectos como el crecimiento en diámetro y altura, la longitud de la copa y la densidad de la masa son los factores de mayor influencia en la presencia de estas diferencias en la forma del fuste. En este sentido, Pinkard y Beadle (1998b) generalizan que las condiciones medioambientales y los factores selvícolas que afecten a la longitud de la copa o la densidad del sitio son los que pueden modificar la forma y perfil del tronco.

Por tanto, será de gran interés incorporar en el futuro otros aspectos asociados con la forma del árbol dentro las funciones, como el espaciamiento originado tras la realización de las claras diseñadas para la segunda fase experimental y otros factores que puedan influir en la forma, crecimiento y perfil del fuste a medio-largo plazo.

4.4. Conclusiones

En este trabajo se ha evaluado el uso de las funciones de perfil para la definición del centro con defectos del fuste podado de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* en Asturias. Se ha seleccionado el modelo de Biging (1984) por su sencillez y buen comportamiento en diferentes especies de coníferas. En el modelo ajustado se ha considerado la intensidad de poda y se ha empleado una estructura de error autorregresiva continua de primer orden para la corrección de la autocorrelación. La estructura de los datos utilizados y el tamaño de la muestra disponible en la actualidad limitaron la validación del modelo, así como el empleo de otras ecuaciones que han demostrado recientemente buenos resultados para la definición del fuste sin defectos. Los resultados obtenidos en la fase de ajuste sugieren considerar el uso de las funciones de perfil para la estimación del centro con defectos del fuste podado de ambas especies. De acuerdo con esto, la utilización conjunta de las funciones de perfil definidas sin considerar defectos, y las funciones de perfil aquí planteadas, considerando los defectos de los verticilos podados, permitiría realizar una diferenciación del fuste por calidades en función de la proporción del tronco conformada por madera de buena y mala calidad. Esta aplicación de las funciones de perfil ayudaría a afinar la clasificación de productos en pie incluyendo el parámetro madera libre de nudos.

Ha sido propuesto un método simple para la determinación del diámetro sobre muñones a cualquier altura del árbol. Se basa en estimar el diámetro del fuste sin defectos, mediante las funciones de perfil propuestas por Canga (2008) para *Pinus radiata* y Arias (2009) para *Pinus pinaster*, de acuerdo con el modelo segmentado de Fang *et al.* (2000), y agregarle un valor de engrosamiento dado por los muñones de poda. El valor de este engrosamiento fue definido para cada especie e intensidad de poda. El engrosamiento ha sido significativamente mayor para *Pinus radiata* y para la poda de mayor intensidad (severidad del 45%). La metodología utilizada en este trabajo permite la estimación del perfil del centro con defectos, considerando las deformaciones de los verticilos podados, de forma compatible con las ecuaciones de perfil definidas habitualmente sin considerar los defectos del tronco.

La evaluación de la forma del fuste se basó en la determinación del coeficiente de forma. Las diferencias fueron significativas solamente para la poda más débil del primer inventario en relación con el resto de tratamientos de poda. La forma de ambas especies no resultó significativamente diferente. En los dos momentos evaluados la poda de mayor intensidad (severidad del 45%) mostró los fustes con formas más cilíndricas, seguido de las podas intermedia (severidad del 30%) y débil (severidad del 15%). Los resultados obtenidos deberán ser confirmados a medio-largo plazo, dado el mayor interés de la forma del fuste en el momento de corta,

siendo esperable un mayor rendimiento industrial para los fustes con mayor forma cilíndrica.

Dado que no existen estudios similares en el ámbito atlántico, este trabajo supone un importante antecedente que servirá de base para investigaciones posteriores y permitirá a medio-largo plazo generar un mayor conocimiento acerca de la influencia de la especie y la intensidad de poda sobre la forma y perfil del centro defectuoso del fuste podado. La evaluación futura de los ensayos, tras la realización conjunta de la poda alta y las claras, aportará una valiosa información para la gestión y optimización de la producción de madera de calidad en las masas de ambas coníferas del ámbito atlántico.



CAPÍTULO 5

**Influencia de la poda sobre el
crecimiento de árboles de *Pinus radiata*
D. Don y *Pinus pinaster* Aiton**

INFLUENCIA DE LA PODA SOBRE EL CRECIMIENTO DE ÁRBOLES DE *Pinus radiata* D. Don Y *Pinus pinaster* Aiton

5.1. Introducción

El estudio y entendimiento de los procesos implicados en el **crecimiento** de un árbol o, en su conjunto de una masa forestal, resulta de gran utilidad para su correcta gestión. El árbol, como todo organismo vivo, experimenta procesos de crecimiento que dan lugar a una variación en su tamaño, con un incremento dimensional del mismo. Este crecimiento se produce en zonas especializadas que reciben el nombre de meristemos, debiendo diferenciar entre meristemos primarios, implicados en el incremento longitudinal, y meristemos secundarios, relacionados con su incremento diametral. De esta manera, el tamaño final del árbol vendrá determinado por la acción conjunta de ambos tejidos meristemáticos, lo que a su vez va a depender de la influencia positiva o negativa de otros factores internos (principalmente características genéticas) y externos (p.e. calidad del sitio, gestión selvícola y condiciones climáticas) que intervienen en el proceso de crecimiento.

De forma sencilla, tal y como propone Zeide (1993), se puede considerar que el crecimiento de un árbol a lo largo de su ciclo vital es el resultado de la interacción de dos factores opuestos que van a potenciar o limitar el crecimiento del mismo. De acuerdo con esto, Zeide (1993) diferencia: (1) la tendencia intrínseca hacia un crecimiento ilimitado que depende de aspectos como el potencial biótico del individuo, su actividad fotosintética, la absorción de nutrientes, o los procesos catabólicos y anabólicos; y (2) las restricciones al crecimiento impuestas por el entorno en el que se desenvuelve, relacionadas con factores como la competencia con otros organismos, la limitación de los recursos, los procesos respiratorios o el estrés, así como las restricciones debidas a la propia condición de ser vivo, asociadas principalmente con los mecanismos de autorregulación del crecimiento y del envejecimiento.

Considerando estos dos factores opuestos, el crecimiento de un árbol responde a un proceso complejo en el que interactúan diversos factores asociados y en donde, en muchos casos, existe una cierta temporalidad del efecto causado por los mismos, dificultando así la correcta caracterización del proceso. De todos los aspectos que intervienen en el crecimiento de un árbol, el mayor interés para el gestor forestal recae sobre aquellos factores cuya influencia en el crecimiento puede verse afectada por la propia actividad del gestor.

De acuerdo con esto, uno de los aspectos más importantes a considerar por el gestor, dado su efecto sobre el crecimiento, es la interacción espacial del árbol con otros pies cercanos. Este factor, conocido habitualmente por el término de **competencia**, suele ser considerado *a priori* como un proceso antagónico que perjudica el crecimiento (Gadow *et al.*, 2001; Rodríguez, 2005). Sin embargo, en función del tipo de masa y la especie, la interacción espacial de los árboles también puede provocar, en algunas circunstancias, situaciones favorables para todos los individuos afectados (p.e. algunas especies de clima templado requieren protección en los primeros años). En el caso concreto de las masas productivas de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster*, la competencia entre pies cercanos supone un efecto negativo sobre el crecimiento y producción de los árboles. Por ello, en este tipo de masas, resulta clave que el gestor forestal realice el control y la reducción de la competencia existente sobre los individuos que presenten mejores características para producir madera de calidad (árboles de porvenir), con el fin de favorecer su crecimiento y maximizar el volumen final producido por los mismos. Para conseguir esto, el gestor puede intervenir sobre la densidad de la masa en las primeras etapas de instalación, seleccionando una adecuada cantidad y distribución de las plantas, e incluso en etapas posteriores, realizando cortas intermedias (clareos y/o claras).

Otros factores sobre los que el gestor puede intervenir, y que han sido ampliamente destacados como determinantes en el crecimiento de un árbol, son: el **material forestal de reproducción** y la **calidad de estación**. Ambos aspectos deben ser considerados en la fase previa de instalación y establecimiento de la masa. En el primer caso, el gestor puede actuar sobre la calidad del material vegetal mediante la selección de aquellas plantas que previsiblemente presenten características favorables para su crecimiento, y cuyas propiedades genéticas y morfológicas sean acordes con el objetivo final de la masa (p.e. rectitud del fuste y baja ramosidad para producir madera de calidad). De la misma manera, las características del sitio pueden verse influenciadas por la actuación del gestor mediante la selección de aquellos lugares que presenten unas condiciones favorables para el crecimiento y desarrollo de las plantas.

Por último, una de las actividades más importantes para el gestor forestal, por su influencia sobre el crecimiento, en masas ya establecidas, es la **selvicultura**, que debe ser acorde con la especie y el objetivo final de la masa. En el caso concreto de masas de coníferas, gestionadas con el fin de obtener madera de calidad, las claras y las podas han sido intervenciones ampliamente señaladas por su papel clave en la consecución de dicho objetivo. Por una parte, la adecuada realización de las *claras* ha sido asociada con un efecto positivo en el crecimiento diametral del árbol (p.e. Smith *et al.*, 1997; Tavira, 1997; Forrester *et al.*, 2010; 2012), al reducir la competencia y aportar unas mejores condiciones para el crecimiento de los pies que permanecen en la masa (mayor espaciamiento y cantidad de recursos disponibles).

Por otra parte, la realización de *podas* ha mostrado resultados contradictorios. Así, en algunos trabajos (p.e. Davel y Sepúlveda, 2000; Schoelzke, 2003; Muñoz *et al.*, 2005; Cyr, 2006) se han encontrado efectos positivos de la poda sobre el crecimiento; en otros (p.e. Sutton y Crowe, 1975; Pinkard y Beadle, 1998b; Nutto y Touza, 2004; Amateis y Burkhart, 2010; 2011) se han obtenido efectos negativos, e incluso, en algunos casos (Muñoz *et al.*, 2005), no se ha observado ningún efecto del tratamiento sobre el crecimiento. A todo lo anterior habría que añadirle, además, las posibles diferencias en el reparto del crecimiento en diámetro y altura del árbol tras la poda (p.e. Nutto y Touza, 2004; Barrio *et al.*, 2009). Estas variaciones en el incremento de ambas variables han sido relacionadas generalmente con la distribución de los carbohidratos en el árbol (Lanner, 1985; Cannell y Dewar, 1994; Neilsen y Pinkard, 2003; Amateis y Burkhart, 2010) y con el tipo de meristemas afectados en la operación (Geber, 1990; Zeng, 2001).

La variabilidad observada en la bibliografía para el efecto de la poda sobre la tasa de crecimiento del árbol ha sido asociada, en su mayoría, con la intensidad del tratamiento, atendiendo especialmente al porcentaje de copa remanente, por ser ésta la que contribuye a la asimilación de carbono y por tanto al crecimiento. Así, por ejemplo, la menor longitud de la copa viva remanente tras la intervención de poda ha sido frecuentemente relacionada con el menor crecimiento de los árboles (p.e. O'Hara, 1991; Montagu *et al.*, 2003). Para otros autores como Sutton y Crowe (1975), O'Hara (1989; 1991), Reitch *et al.* (1993), Seitz (1995) o Pinkard y Beadle (1998 a;b), la disminución de crecimiento de los árboles está relacionada con la eliminación de verticilos, independientemente de la longitud de copa remanente. Barret (1986), sin embargo, considera que la reducción de crecimiento vendrá determinada realmente por la combinación de ambos criterios, de manera que se debe tener en cuenta la proporción de verticilos eliminados y la copa viva remanente tras la poda.

Por otro lado, además de la intensidad de la poda, la frecuencia con la que se realiza dicha intervención, especialmente el tiempo transcurrido entre cada tratamiento y el número de operaciones realizadas, van a resultar igualmente determinantes en el crecimiento de los árboles tras la poda (Fassola *et al.*, 1999 b;d; 2002b). Así, diversos estudios han observado que menores intervalos de tiempo entre intervenciones (p.e. Karani, 1978) y mayor número de tratamientos de poda (p.e. Sutton y Crowe, 1975; Fassola *et al.*, 1999 b;d) implican una disminución del crecimiento. Sin embargo, de acuerdo con autores como Pinkard y Beadle (2000), este comportamiento va a depender estrechamente de aspectos asociados con la copa como su estructura, su patrón de distribución foliar y su grado de compensación en la respuesta fisiológica al tratamiento de poda. De acuerdo con esto, la biomasa foliar de la copa va a representar un papel fundamental en la recuperación de los árboles podados. En este sentido, de acuerdo con autores como Reich *et al.* (1993) y

Montagu *et al.* (2003) se debe considerar además que la poda puede inducir cambios en la distribución de la biomasa de la copa remanente para compensar la eliminación de ramas vivas (fotosintéticamente activas), lo que supone una recuperación de los árboles tras la realización de dicha intervención selvícola. Esta recuperación del crecimiento de los árboles podados ha sido observada en diversas especies de coníferas y frondosas (p.e. Sutton y Crowe, 1975; Endo y Velez-Mesa, 1992; Pinkard y Beadle, 1998b; De Montigny y Stearns-Smith, 2001; Viquez y Pérez, 2005; Amateis y Burkhart, 2006; Smith *et al.*, 1997; Barrio *et al.*, 2009; Amateis y Burkhart, 2011), con un período de duración del efecto del tratamiento que va a depender de aspectos como la especie, las características genéticas o las propias condiciones de crecimiento en la masa, destacando en este último caso la calidad de estación, el estado de desarrollo de la masa y, sobre todo, la distribución de los pies, en donde la realización de claras juega un papel fundamental.

Por todo lo anterior, cabe destacar la importancia de considerar de forma conjunta la influencia de las podas y las claras a medio-largo plazo en las masas gestionadas para producir madera de calidad. A pesar de esto, son pocos los estudios a nivel mundial que han evaluado el efecto combinado de estas intervenciones sobre el crecimiento (p.e. García (1990) en *Pinus radiata* en Nueva Zelanda; Velazquez-Martínez *et al.* (1992) en *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco en Estados Unidos; Fassola *et al.* (1999 b;d; 2002b; 2008b) y Costas *et al.* (2005) en *Pinus taeda* L. en Argentina; Muñoz *et al.* (2005) en *Eucalyptus nitens* H. (Deane&Maiden) Maiden en Chile; Forrester *et al.* (2010; 2012) en *Eucalyptus* spp. en Australia). Concretamente para *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* en Europa, las claras han sido las intervenciones selvícolas más estudiadas, siendo encontrados tan solo los estudios de poda de Courdier *et al.* (2002) para *Pinus pinaster* en Las Landas y de Chauchard y Olalde (2005; 2006) para *Pinus radiata* en el País Vasco, pero en ningún caso se han evaluado los efectos combinados de ambas intervenciones para estas coníferas. En estos trabajos, además, ha sido poco habitual la evaluación de la dinámica del crecimiento individual del árbol y su estatus social en función de la selvicultura aplicada, siendo mucho más frecuente la consideración del efecto de ambas operaciones en el conjunto de los pies de la masa. Este planteamiento, sin embargo, tal y como apuntaron recientemente Forrester *et al.* (2012), puede llegar a esconder el verdadero efecto de las actuaciones efectuadas sobre cada árbol de forma individual, lo que será aún más importante para los pies de porvenir, por su mayor valor en las masas productivas gestionadas mediante una selvicultura de podas y claras.

El mayor entendimiento de éstos y otros factores relacionados con el crecimiento de un árbol han sido y siguen siendo objeto de investigación. Dentro de este fin, el empleo de ecuaciones matemáticas ha permitido simplificar enormemente este proceso. Para ello, se han ido desarrollando diversos tipos de modelos, de mayor o

menor complejidad en función de los aspectos incluidos en su formulación y el nivel de detalle de las predicciones. Esto, a su vez, ha estado relacionado con las diferentes ramas científicas interesadas en el estudio del crecimiento de las plantas y con la información a modelizar en cada momento. De esta manera, en las áreas más próximas a la fisiología y a la genética se han desarrollado habitualmente ecuaciones de crecimiento con una mayor vinculación al funcionamiento interno de los árboles (p.e. De Wit, 1959; Pertunnen *et al.*, 1996; Godin y Sinoquet, 2005; Vos *et al.*, 2007; Evers *et al.*, 2007; Van Keulen *et al.*, 2008) y un nivel de predicción más detallado. Sin embargo, para las disciplinas asociadas al área más forestal, los modelos de crecimiento determinados han mostrado, generalmente, una mayor relación con factores externos (especialmente la gestión selvícola) y un menor nivel de predicción. Asimismo, hoy en día resulta cada vez más frecuente la integración de distintas áreas de conocimiento científico dentro de un mismo modelo, tratando de determinar funciones que consideren conjuntamente los principales aspectos internos y externos asociados con el crecimiento del árbol y el desarrollo de una masa forestal. En este sentido, dentro de los factores externos cabe destacar el creciente interés despertado por las condiciones ambientales en que se desarrolla el árbol, especialmente el clima, dado su papel protagonista en el cambio climático y la importancia adquirida por dicho fenómeno en los últimos años.

Independientemente de los factores considerados, tal y como indican Gadow *et al.* (2001) y Kiviste *et al.* (2002), los **modelos de crecimiento** desarrollados en el ámbito forestal tratan de representar, de una forma más o menos compleja, la dinámica de los sistemas forestales, determinando para ello la evolución de las principales variables dasométricas (generalmente altura dominante, área basimétrica, densidad y volumen) y/o dendrométricas (habitualmente diámetro o sección normal y altura total) a lo largo de la vida del árbol. De acuerdo con Kiviste *et al.* (2002), la representación de dicha evolución se corresponde con una curva sigmoide cuyo valor coincide con el de la variable a modelizar en un momento determinado o, lo que es lo mismo, con el crecimiento acumulado del tamaño (“*growth function*”, equivalente a la forma integral de la función de crecimiento). Por otro lado, estos autores (Kiviste *et al.*, 2002) señalan que el verdadero crecimiento de un árbol se corresponde con el incremento del tamaño referido a un período de tiempo determinado o, lo que es lo mismo, con el crecimiento corriente del tamaño (“*increment function*”, equivalente a la forma diferencial de la función de crecimiento, que coincide con la derivada de la curva sigmoide). En cualquier caso, todo modelo forestal de crecimiento, tal y como indican Pienaar y Turnbull (1973), siempre debe ser construido bajo las premisas de un comportamiento lógico y una base biológica que permita su utilización para cualquier conjunto de datos de una forma más exacta.

Las ecuaciones matemáticas que componen un modelo forestal de crecimiento han sido expresadas habitualmente en forma tabular o gráfica (Vanclay, 1994), siendo cada vez más frecuente su inclusión en programas de ordenador o simuladores informáticos (Diéguez-Aranda, 2009). Estos avances en la presentación de los modelos han estado relacionados, en gran medida, con la evolución de los mismos en el tiempo, así como con la mayor complejidad que éstos han ido adquiriendo en respuesta a las necesidades surgidas por gestores e investigadores. En todos estos cambios, tal y como recogen Gadow *et al.* (2001), han jugado un papel protagonista las mejoras informáticas de los últimos años, que han permitido realizar análisis matemáticos y emplear métodos estadísticos cada vez más complejos y fiables. De esta manera, los modelos forestales de crecimiento desarrollados hasta el momento han ido ganando mayor flexibilidad para las situaciones simuladas, pudiendo llegar a predecir el desarrollo de las masas forestales y anticiparse a las consecuencias que una determinada acción puede tener sobre el sistema (Gadow *et al.*, 2001; Chauchard y Sbrancia, 2003; Castedo-Dorado, 2004; Flores y Lee, 2004).

En la actualidad existe una gran diversidad de modelos forestales de crecimiento que pueden ser caracterizados bajo diferentes criterios de clasificación. Todos ellos son identificados por la especie y la aplicabilidad geográfica o las condiciones ambientales en las que se desarrollan, no considerando estos factores como criterios de clasificación (Diéguez-Aranda *et al.*, 2009). El tipo de modelo más adecuado para cada caso concreto va a depender de diversos aspectos, como son: el uso a que se destine dicho modelo, sus objetivos, las características de la masa, los recursos disponibles y el intervalo de proyección (Vanclay, 1994; Burkhart, 2003; García, 2003). Asimismo, estos factores van a ser determinantes en el tipo de datos necesarios para desarrollar el modelo y en la exactitud de las estimaciones realizadas por el mismo (Diéguez-Aranda, 2004). Por todo ello, y dada la diferenciación de una amplia variedad de funciones de crecimiento, se recogen a continuación algunas de las principales características que permiten clasificar los distintos tipos de modelos existentes.

Una primera división de las ecuaciones de crecimiento podría ser la diferenciación entre **modelos empíricos**, que intentan explicar la dinámica de los árboles y de la masa a partir de datos experimentales procedentes de parcelas de investigación de una región determinada, sin considerar los mecanismos y procesos elementales de crecimiento (Diéguez-Aranda *et al.*, 2009) y los **modelos mecanísticos**, que tratan de explicar el crecimiento a través de conocimientos sobre el funcionamiento y fisiología de los árboles (Rodríguez, 2005). En el primer caso, las ecuaciones presentan una gran simplicidad y utilidad práctica (Castedo-Dorado *et al.*, 2007b), pudiendo ser empleados tan solo en zonas o en condiciones climáticas acordes con el rango de datos y el área geográfica utilizados en su ajuste (Diéguez-

Aranda *et al.*, 2009). Dentro del segundo tipo de ecuaciones, cabe destacar los denominados modelos basados en procesos, cuyo protagonismo ha sido creciente en la investigación forestal llevada a cabo en los últimos años. Su principal ventaja se basa en la posibilidad de realizar proyecciones robustas para condiciones medioambientales cambiantes (Diéguez-Aranda *et al.*, 2009). Sin embargo, estos modelos precisan de un gran número de parámetros para su determinación. En este contexto, y para solventar las limitaciones de ambos tipos de modelos (empíricos y mecanísticos), han surgido recientemente los denominados modelos *híbridos*, que tratan de considerar la influencia medioambiental, partiendo de un nivel de información menos exhaustivo que los modelos mecanísticos, y aportar, al igual que los modelos empíricos, salidas válidas para la gestión forestal práctica (Diéguez-Aranda *et al.*, 2009).

En términos de precisión, se puede diferenciar entre modelos *determinísticos*, que generan siempre las mismas predicciones para un mismo escenario (empleando los mismos datos de entrada e iguales algoritmos), y *estocásticos*, que introducen deliberadamente un componente aleatorio en el modelo dando lugar a diferentes estimaciones para cada simulación (probabilidad de ocurrencia diferente para cada simulación) (Canga, 2008; Diéguez-Aranda *et al.*, 2009).

Desde otro punto de vista, los modelos se pueden dividir en *estáticos*, cuando no consideran de forma explícita la tasa de crecimiento, y *dinámicos*, cuando tienen en cuenta la evolución en el tiempo de las variables dendro y/o dasométricas empleadas en su formulación. En el primer caso, destacan las tablas de producción, por tratarse del primer tipo de modelo estático de masa desarrollado. Sin embargo, este tipo de tablas han empezado a ser reemplazadas cada vez más por los denominados diagramas de manejo de la densidad (*SDMD*, acrónimo de su nombre en inglés “*Stand Density Management Diagrams*”). Estos diagramas aportan facilidad y rapidez, así como la posibilidad de comparar diferentes esquemas de claras, mostrando la relación existente entre diferentes variables de masa (Bravo *et al.*, 2012). No obstante, tal y como apuntan Rodríguez (2005) y Diéguez-Aranda *et al.* (2009), entre otros, los *modelos de crecimiento estáticos* presentan buenos resultados cuando se trata de masas no aclaradas, o cuando éstas han sido ligeramente modificadas mediante un reducido número de tratamientos, siempre que se tenga un número suficiente de datos experimentales que permita cubrir las diferentes combinaciones de edad, densidad y calidad del sitio del área de estudio. Sin embargo, cuando se necesita considerar un amplio rango de regímenes selvícolas, o para datos procedentes de diferentes tipos de parcelas, con diversas clases de tratamientos, así como para realizar proyecciones del futuro estado de una masa forestal, resulta necesario determinar *modelos de crecimiento dinámicos*.

Por último, una de las clasificaciones más frecuentemente utilizada en modelización forestal diferencia los modelos en función de la escala o nivel de detalle considerado (García, 1988; Erviti, 1991; Pardé y Bouchon, 1994; Vanclay, 1994; Gadow *et al.*, 2001). Dentro de los diferentes niveles, se podrían distinguir desde ecuaciones más globales, generalmente a nivel de región, hasta modelos más detallados, que tratan de describir el crecimiento de una rama, un brote, una hoja o incluso una célula. De todos ellos, en el ámbito forestal, los modelos forestales de crecimiento empleados habitualmente, son (de menor a mayor nivel de detalle): (1) los de escala **regional** (“*forest models*”); (2) los de **masa o rodal** (“*stand models*”); y (3) los de **árbol individual** (“*individual tree models*”), existiendo también funciones intermedias entre los niveles comentados (p.e. los modelos de **clases diamétricas** o de **clases de tamaños**, que se encuentran entre los niveles de masa y de árbol individual). Los modelos de *bosques* o *regiones* (Persson, 1992; Gadow *et al.*, 2001) tratan de aportar información sobre grandes superficies, estando normalmente vinculados con objetivos de ordenación del territorio (p.e. Castedo-Dorado, 2004; Rodríguez, 2005; Diéguez-Aranda *et al.*, 2009). Los *modelos de masa* informan sobre el desarrollo probable del conjunto de árboles que constituyen un rodal a través de sus variables de masa (Gadow *et al.*, 2001; Castedo-Dorado, 2004). Estas ecuaciones presentan la ventaja de requerir poca información, siendo los modelos más sencillos y robustos a largo plazo, proporcionando generalmente buenas estimaciones de las variables dasométricas (Burkhart, 2003). Sin embargo, se trata de funciones que no permiten conocer la estructura de la masa (Rodríguez, 2005) ni tampoco la producción de la masa para distintas clases comerciales, motivo por el cual surgieron los *modelos de clases de dimensión y de árbol individual* (Castedo-Dorado, 2004; Diéguez-Aranda *et al.*, 2009). Este último tipo de modelos es mucho más preciso que los de masa, al apoyarse en fenómenos que condicionan el crecimiento a un nivel más específico (Castedo-Dorado, 2004). Se trata de funciones más complejas y de mayor nivel de detalle, que tratan de describir el crecimiento individual de cada árbol a partir de los fenómenos que lo condicionan (Diéguez-Aranda *et al.*, 2009). De acuerdo con la bibliografía, estas funciones resultan habitualmente recomendables para la simulación de un mayor rango de tratamientos selvícolas (García, 2003; Crecente-Campo, 2008), para proyecciones a corto plazo (Burkhart, 2003), o cuando se requiere de información del crecimiento a un nivel más detallado (García, 1994). La mayoría de los modelos de árbol individual utilizan algún índice de competencia en su formulación, pudiendo diferenciar entre *modelos individuales independientes de la distancia*, cuando los índices de competencia empleados no requieren información acerca de la distribución espacial de los pies, y *modelos individuales dependientes de la distancia*, cuando dichos índices requieren caracterizar la competencia espacial existente entre los pies de la masa, precisando conocer las coordenadas de los

mismos (Gadow *et al.*, 2001). Independientemente de la consideración o no de esta información espacial, los modelos de árbol individual requieren de un gran volumen de datos para su construcción y utilización, que en algunos casos resultan bastante costosos de conseguir, y que además exigen una elaboración metodológica más compleja que en el caso de modelos con un menor nivel de detalle (p.e. modelos de masa) (Castedo-Dorado, 2004; Diéguez-Aranda *et al.*, 2009). Por otra parte, se debe añadir que los resultados obtenidos para cada árbol deben ser agrupados para la obtención de resultados en el conjunto de la masa, siendo importante conseguir la compatibilidad entre las predicciones proporcionadas por un modelo de masa y las obtenidas por agregación en un modelo de árbol individual (Crecente-Campo, 2008). Por último, tal y como apunta Hasenauer (2006), se debe considerar que la transición desde los modelos de masa hasta los modelos de árbol individual puede suponer un cambio importante en la modelización forestal, al no existir en estos últimos límites predefinidos en relación con la mezcla de especies, los tratamientos selvícolas y/o la edad.

De acuerdo con todas las consideraciones anteriores, los modelos forestales de crecimiento han alcanzado un gran potencial a nivel mundial como herramientas de ayuda a la gestión forestal, pudiendo encontrar una gran diversidad de funciones definidas para un elevado número de especies y ámbitos geográficos.

En España, en particular, se han venido desarrollando modelos de crecimiento para algunas de las especies forestales más importantes del territorio peninsular desde mediados del siglo XX. De esta manera, se pueden encontrar actualmente ejemplos para prácticamente todos los criterios de clasificación comentados, y una descripción detallada se puede obtener en la recopilación de Bravo *et al.* (2012).

Por otra parte, en el noroeste peninsular, en donde se ha llevado a cabo el presente trabajo, y para el caso particular de las coníferas aquí estudiadas (*Pinus radiata* y *Pinus pinaster*), el mayor avance en el desarrollo de modelos forestales de crecimiento ha sido realizado en Galicia. Así, para esta parte del territorio, se han elaborado tablas de producción de *Pinus radiata* (Echevarría, 1942; Sánchez, 2001; Sánchez *et al.*, 2003) y *Pinus pinaster* (Echevarría y De Pedro, 1948; Molina y Ruiz Zorrila, 1976; Madrigal y Martínez-Millán, 1992; Rodríguez-Soalleiro, 1995), *SDMD* para *Pinus radiata* (Castedo-Dorado *et al.*, 2007a; 2009a) y *Pinus pinaster* (Castedo-Dorado *et al.*, 2009b), modelos dinámicos de masa para *Pinus radiata* (Castedo-Dorado, 2004; Castedo-Dorado *et al.*, 2007b) y *Pinus pinaster* (Rodríguez-Soalleiro, 1995; Álvarez-González *et al.*, 1999; Álvarez-González *et al.*, 2005; Barrio-Anta *et al.*, 2006) y, más recientemente, ha sido construido un modelo de árbol individual para *Pinus radiata* (Crecente-Campo, 2008). En el caso concreto de Asturias, se han determinado los modelos estáticos de masa de Canga (2008) para *Pinus radiata*, expresados como tablas de producción, y de Barrio-Anta y Cámara-

Obregón (2008) para *Pinus pinaster*, en forma de *SDMD*. Sin embargo, para las masas de ambas coníferas en el territorio asturiano no han sido desarrollados a día de hoy modelos de crecimiento de tipo dinámico ni modelos de crecimiento para un nivel de detalle más específico (p.e. modelos de árbol individual).

Por otra parte, cabe destacar que en todo modelo forestal de crecimiento, uno de los enfoques más importantes a considerar durante su determinación y posterior aplicación práctica se relaciona con la posibilidad de predecir el crecimiento de los árboles y/o desarrollo de las masas forestales en respuesta a las actuaciones selvícolas. Dentro de las diferentes operaciones selvícolas a incluir en este tipo de modelos, las claras han sido las más utilizadas. De hecho, la realización de claras ha sido el único cuidado cultural incluido en los modelos forestales de crecimiento determinados hasta el momento en el noroeste peninsular. La consideración de este tipo de intervenciones resulta muy útil para simular la evolución de un rodal en condiciones de crecimiento natural y bajo diferentes alternativas de clara. Sin embargo, estas ecuaciones se encuentran limitadas para la toma de decisiones que incluya un mayor rango de alternativas selvícolas, como es el caso de las masas productivas gestionadas bajo una selvicultura de podas y claras. Por ello, resulta necesario desarrollar ecuaciones que permitan considerar a su vez el efecto de la poda dentro de su formulación, dada la importancia de dicho tratamiento en ese tipo de masas. Este planteamiento ha sido respaldado por autores como García (1993) o Costas *et al.* (2006; 2007), entre otros, destacando la importancia de incluir en los modelos forestales de crecimiento alguna variable relacionada con el tratamiento de poda.

Con estos antecedentes, el **objetivo general** del presente capítulo se ha centrado en evaluar el efecto de la poda en la dinámica del crecimiento individual de los árboles y su influencia sobre la estructura de la masa, para rodales regulares jóvenes de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* en Asturias. Para ello, se han planteado los siguientes **objetivos específicos**: (1) estimar el efecto de la intensidad de poda sobre el crecimiento en diámetro y altura de los árboles podados de ambas coníferas; (2) definir un modelo descriptivo sencillo, de tipo dinámico, que aporte una mayor información sobre el crecimiento individual en diámetro y altura de los árboles de ambas especies, considerando la intensidad de poda aplicada, el tamaño del árbol, variables de masa e índices de competencia independientes de la distancia; y (3) evaluar la influencia de la poda sobre el mantenimiento o cambio del estatus social de los árboles y la producción en volumen unitario en función de la especie y/o intensidad del tratamiento de poda.

5.2. Material y métodos

5.2.1. Datos empleados

Para el estudio del crecimiento individual de árboles podados en masas de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* en Asturias, han sido evaluados ocho sitios de ensayo (cuatro de *Pinus radiata* y cuatro de *Pinus pinaster*) pertenecientes a la red de parcelas permanentes de podas y claras del SERIDA, cuya descripción ha sido realizada con mayor detalle en el capítulo 2 y en el anexo de la presente tesis.

La muestra utilizada en este estudio estuvo conformada por datos procedentes de tres inventarios, que fueron efectuados en cada una de las parcelas de la red experimental. Los dos primeros inventarios se llevaron a cabo en el mismo intervalo temporal para todas las parcelas, mientras que el tercer inventario fue realizado en años diferentes para cada especie. El primer inventario fue efectuado durante el invierno 2005-2006, tras la instalación de los ensayos y ejecución de la primera intervención de poda (primera fase experimental), siendo durante el invierno 2008-2009, tres años después de la poda, cuando tuvo lugar el segundo inventario. Por otra parte, el tercer inventario se hizo coincidir con la primera intervención de clara (segunda fase experimental), efectuada en años diferentes para cada especie, en función del estado de desarrollo de las masas (invierno 2009-2010 para *Pinus radiata* e invierno 2010-2011 para *Pinus pinaster*).

En cada uno de los inventarios realizados se llevó a cabo la medición cruzada del diámetro normal (d), en todos los pies de la masa, con ayuda de una forcípula de precisión milimétrica. Asimismo, para los dos primeros inventarios, se tomó el valor de la altura total (h) de todos los árboles, variable que en el tercer inventario fue medida tan solo en aquellos individuos que permanecieron en pie tras la clara. Por otra parte, también fueron caracterizadas las alturas alcanzadas por la poda (h_{base}), tras la ejecución de la misma, con el fin de determinar la intensidad real de la intervención efectuada en cada árbol. Todas las alturas (h y h_{base}) fueron medidas mediante Vertex III y Vertex IV, de precisión decimétrica. Por último, en todos los casos fueron anotadas aquellas observaciones que se considerasen importantes (p.e. árbol enfermo o muerto) para el correcto análisis y posterior interpretación de los resultados.

Una vez examinados todos los datos, fueron utilizados un total de 26.167 pares de valores $h-d$ (12.405 de *Pinus radiata* y 13.762 de *Pinus pinaster*), cuya distribución se encuentra representada en la Figura 5.1.

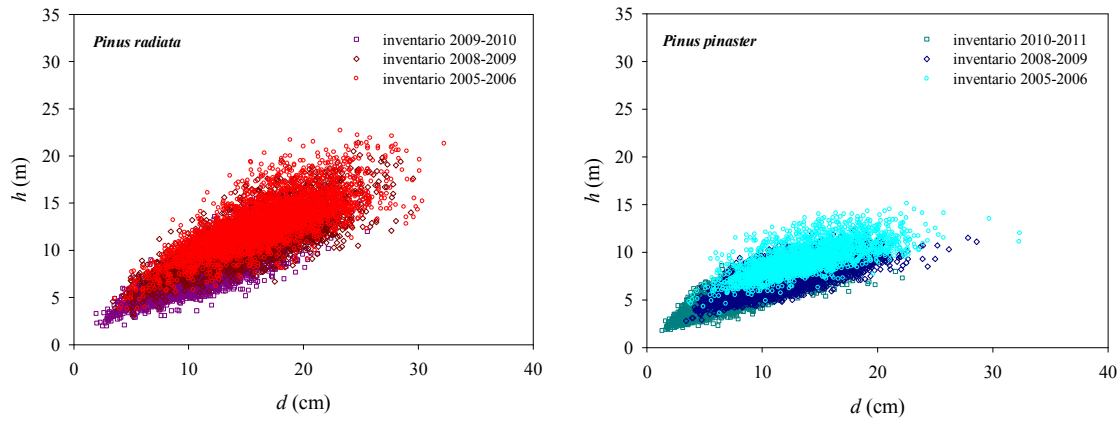


Figura 5.1. Gráficos de dispersión de los valores de diámetro normal con corteza (d) y altura total (h) que constituyen la muestra empleada en el estudio del crecimiento (12.405 pares de valores de *Pinus radiata* (izquierda) y 13.762 pares de valores de *Pinus pinaster* (derecha)).

Las variables tomadas en campo permitieron determinar, para cada especie (*Pinus radiata* y *Pinus pinaster*) y subparcela de poda (62 para *Pinus radiata* y 64 para *Pinus pinaster*), las principales características dasométricas de los rodales estudiados, cuya metodología de cálculo se encuentra explicada en el capítulo 2. En la Tabla 5.1 se muestran los estadísticos descriptivos (media, mínimo, máximo y desviación estándar) de algunas de las principales variables dendro y dasométricas diferenciadas para cada especie para todo el período de estudio.

Tabla 5.1. Valores característicos de algunas de las principales variables dendro y dasométricas pertenecientes a los ensayos permanentes de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* empleados en el estudio del crecimiento del árbol para todo el período de estudio.

Especie	Variable	Media	Mínimo	Máximo	Desv. Std.
<i>Pinus radiata</i>	d	14,18	1,80	32,25	4,57
	h	10,25	1,50	22,70	3,20
	d_m	14,00	8,87	17,90	2,35
	h_m	10,27	6,05	14,36	2,10
	D_0	21,34	14,12	28,15	3,46
	H_0	13,05	7,30	19,16	2,86
	d_g	14,55	9,43	18,56	2,43
	G	22,37	8,48	43,21	7,81
	N	1.305,22	901,48	1.637,16	148,36
	t	10,87	7	14	2,06
<i>Pinus pinaster</i>	d	10,86	1,30	32,35	4,28
	h	6,67	1,25	15,1	2,12
	d_m	10,83	5,11	16,19	3,03
	h_m	6,97	3,79	10,3	1,75

Tabla 5.1 (continuación). Valores característicos de algunas de las principales variables dendro y dasométricas pertenecientes a los ensayos permanentes de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* empleadas en el estudio del crecimiento del árbol, para todo el período de estudio.

Especie	Variable	Media	Mínimo	Máximo	Desv. Std.
<i>Pinus pinaster</i>	D_0	16,75	8,91	29,38	4,41
	H_0	8,48	4,87	12,51	1,97
	d_g	11,26	5,46	16,67	3,10
	G	16,21	3,30	32,14	7,78
	N	1.551,77	1.046,75	2.408,12	261,41
	t	11,17	7	16	2,55

donde d es el diámetro normal (medido a 1,3 m sobre el nivel del suelo), en cm; h es la altura total, en m; d_m es el diámetro medio a nivel de rodal, en cm; h_m es la altura media a nivel de rodal, en m; D_0 es el diámetro dominante, correspondiente con el diámetro medio de los 100 pies más gruesos por hectárea, en cm; H_0 es la altura dominante, determinada como la altura media de los 100 pies más gruesos por hectárea (Assmann, 1970), en m; d_g es el diámetro medio cuadrático, en cm; G es el área basimétrica, en m²/ha; N es la densidad, en pies/ha; t es la edad, en años; y Desv. Std. es la desviación estándar de la variable considerada (d , h , etc.).

5.2.2. Tratamiento y análisis de los datos

Partiendo de los datos comentados en el apartado anterior, se llevó a cabo el estudio del crecimiento de los árboles en función de la severidad de poda aplicada y la especie. Para ello, fue planteado un primer estudio descriptivo del crecimiento corriente y acumulado en diámetro y altura en ambas especies. En este análisis inicial fueron evaluadas las posibles diferencias en la respuesta del crecimiento de estas variables (d y h) en función del tratamiento de poda. En un segundo enfoque del trabajo, fue evaluado el crecimiento individual de cada árbol mediante el ajuste de modelos explicativos que incluyeron variables sensibles a la poda, variables dendrométricas relacionadas con el tamaño de los árboles, variables de masa a nivel de subparcela de poda, e índices de competencia independientes de la distancia. Por otra parte, fue realizada una clasificación de los pies en función de su clase de estatus social, evaluando la relación existente entre la clase sociológica y el tratamiento de poda efectuado. Por último, fue evaluada la productividad de los árboles que mantuvieron su estatus social para todo el período de estudio, diferenciando el volumen producido para cada inventario y severidad de poda en las diferentes clases sociológicas.

Los incrementos en diámetro y altura de cada árbol fueron determinados como crecimientos corrientes (ic_d e ic_h) y como crecimientos acumulados (ia_d e ia_h). No obstante, dada la variabilidad temporal existente en el presente trabajo, con una remediación de los árboles en intervalos de entre 1 y 5 años, la mayoría de los análisis efectuados utilizaron como referencia el incremento medio anual o

crecimiento corriente de los árboles. Para obtener el valor de dicho crecimiento fueron considerados los incrementos totales producidos para cada variable (d y h) en el intervalo de tiempo transcurrido entre dos inventarios (cuyo cálculo se encuentra explicado en el apartado 2.5.2 del capítulo 2).

Para el análisis de los datos ha sido utilizado el paquete estadístico SAS 9.1[®] (SAS Institute Inc., 2004 a;b) mientras que la representación gráfica de los resultados ha sido efectuada mediante el programa SigmaPlot 10.0[®] (Systat Software Inc., 2006).

5.2.2.1. Crecimiento individual del árbol en función de la poda

Para analizar el comportamiento de la especie y el posible efecto de la poda en el crecimiento en diámetro y altura del árbol fueron realizados diversos análisis de varianza (ANOVA) mediante el procedimiento MIXED del paquete estadístico SAS/STAT[®] (SAS Institute Inc., 2004b). En un primer paso fue efectuado un ANOVA por especie para determinar las posibles diferencias en crecimiento de ambas coníferas y trabajar, a partir de entonces, con los datos de crecimiento de cada especie por separado o de forma conjunta. En un paso posterior se llevó a cabo un ANOVA de los crecimientos corrientes en diámetro normal y altura total, considerando los efectos del sitio de ensayo, la subparcela de poda y la intensidad real del tratamiento. La intensidad de la intervención fue expresada como la severidad de poda agrupada en 15%, 30% y 45%, siendo evaluada también la intensidad del tratamiento definida en función del número de verticilos y la longitud de la copa remanentes (agrupados en clases con amplitud de 2 verticilos, en el primer caso, y de 2 metros, en el segundo). En todos los casos, los crecimientos fueron utilizados como variables dependiente, y la especie y la intensidad de poda como factores fijos, siendo incluida la subparcela de poda como factor aleatorio. También se incluyeron como covariables los valores de diámetro o altura de cada árbol antes de la poda en los análisis de crecimientos en diámetro y altura, respectivamente. Los resultados obtenidos fueron interpretados de acuerdo con el test de Tukey de comparación de medias para un intervalo de confianza del 95%.

5.2.2.2. Modelo explicativo del crecimiento individual del árbol considerando la intensidad de poda efectuada y otras variables relacionadas con el crecimiento

Modelos analizados

Hoy en día, son diversos los modelos de crecimiento y producción que han sido aplicados en el ámbito forestal, tanto a nivel de masa como de árbol individual. Una primera visión de dichos modelos ha sido realizada en la parte introductoria de este

capítulo, pudiendo encontrar sus principales características de forma más detallada en trabajos como el de Zeide (1993) o, más recientemente, Kiviste *et al.* (2002), en donde se han recopilado y analizado algunos de los principales modelos de crecimiento definidos hasta ese momento. A pesar de que modelizar el crecimiento de un árbol mediante una única ecuación pueda parecer *a priori* bastante complejo, Zeide (1993) observó que la mayoría de los modelos considerados en su trabajo podían ser simplificados en una única ecuación general, expresada como la forma diferencial de la variable a modelizar con respecto al tiempo o, lo que es lo mismo, su incremento anual (y' o dy/dt), cuya formulación matemática puede adquirir las siguientes formas:

$$y' = k_1 \cdot y^p \cdot t^q \text{ o } \ln(y') = k + p \cdot \ln y + q \cdot \ln t \quad (5.1)$$

$$y' = k_1 \cdot y^p \cdot e^{qt} \text{ o } \ln(y') = k + p \cdot \ln y + q \cdot t \quad (5.2)$$

donde y' es la variable dependiente, correspondiente con el crecimiento corriente anual de la variable a modelizar (en este caso, ic_d o ic_h); y es la variable a modelizar (d , en cm; h , en m); t es la edad, en años; e es la base del logaritmo neperiano o logaritmo natural; \ln es el logaritmo neperiano o logaritmo natural; y k , p y q son los parámetros de la ecuación, siendo $k_1 = e^k$.

En las Ecuaciones (5.1) y (5.2) se encuentran recogidos los dos factores opuestos planteados por Zeide (1993), expresando los componentes de expansión del crecimiento como un período exponencial de crecimiento proporcional al tamaño del árbol, y los elementos de reducción del crecimiento, como aspectos asociados con factores del ambiente y con la propia edad del arbolado.

Teniendo en cuenta la expresión que define el incremento corriente anual $((y_2 - y_1)/(t_2 - t_1))$, y de acuerdo con las Ecuaciones (5.1) y (5.2), se llega a las expresiones finalmente utilizadas en la presente tesis para el desarrollo de los modelos de crecimiento en diámetro normal y altura total de árboles podados de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster*:

$$y_2 = y_1 + k_1 \cdot y_1^p \cdot t_1^q \cdot \Delta t \quad (5.3)$$

$$y_2 = y_1 + k_1 \cdot y_1^p \cdot e^{qt_1} \cdot \Delta t \quad (5.4)$$

donde y_2 es el valor de la variable a modelizar (d , en cm; h , en m) al final del período de proyección (t_2); y_1 es el valor de la variable a modelizar (d , en cm; h , en m) al principio del período de proyección (t_1); Δt es el tiempo de proyección, igual a $t_2 - t_1$, en años; e es la base del logaritmo neperiano o logaritmo natural; y k , p y q son los parámetros de la ecuación, siendo $k_1 = e^k$.

Ajuste y determinación de los modelos

Con todo lo anterior, y conocidas las posibles diferencias en crecimiento para cada especie y severidad de poda, tras los análisis de varianza realizados previamente, fueron planteados los modelos de crecimiento a ajustar para ambas

coníferas. Además, se probó la inclusión en los modelos de las siguientes variables de masa e índices de competencia, todos ellos determinados de acuerdo con las expresiones recogidas en el capítulo 2 (apartado 2.5):

- (1) *Variables de masa*: densidad (N , en número de pies/ha); diámetro medio (d_m , en cm); altura media (h_m , en m); diámetro dominante (D_0 , en m); altura dominante (H_0 , en m), área basimétrica (G , en m²/ha); diámetro medio cuadrático (d_g , en cm); e índice de sitio (IS , en m).
- (2) *Variables de árbol individual*: diámetro normal (d , en cm); altura total (h , en m); longitud de copa (L_{copa} , en m) y altura de copa relativa (hcr , adimensional), empleado como factor descriptivo de la poda realizada en cada árbol.
- (3) *Índices de competencia*: cociente entre el diámetro normal del árbol y el diámetro medio cuadrático de la parcela (Rd_g); cociente entre el diámetro normal del árbol y el diámetro medio de la parcela (Rd_m); cociente entre el diámetro normal del árbol y el diámetro dominante de la parcela (RD_0); cociente entre la sección normal del árbol y el área basimétrica de la parcela (RG); ratio entre sección normal del árbol-área basimétrica y diámetro normal-diámetro medio cuadrático (RBA , definido como $((g/G)^{d/dg})$); y área basimétrica de los árboles más gruesos que el árbol sujeto en relación con el área basimétrica de la parcela ($BALrel$). Todos ellos son índices independientes de la distancia, al no haber sido incorporadas las coordenadas de los árboles en su estimación. Según Crecente-Campo *et al.* (2009) la inclusión de índices de competencia independientes de la distancia en un modelo de crecimiento en diámetro podría ser suficiente para considerar los efectos de la competencia en el crecimiento, sin tener que emplear para ello índices dependientes de la distancia.

Para el ajuste de las funciones de crecimiento en diámetro normal y altura total fue utilizado el procedimiento MODEL del paquete estadístico SAS/ETS® (SAS Institute Inc., 2004a). En un primer momento se ajustaron las ecuaciones por separado, empleando para ello el método de mínimos cuadrados ordinarios (OLS, término en inglés “*Ordinary Least Squares*”). Posteriormente, ambas ecuaciones fueron ajustadas de forma simultánea mediante el método de mínimos cuadrados generalizados conjuntos (SUR, término en inglés “*Seemingly Unrelated Regression*”), al considerarse que podía existir una relación entre los errores de ambas funciones por la existencia de términos comunes en las ecuaciones como, por ejemplo, el diámetro normal del árbol al principio del período de proyección (d_1).

Puesto que las bases de datos de diámetros y alturas no son del mismo tamaño y este es un requisito indispensable en el ajuste simultáneo de ecuaciones, para el modelo de crecimiento en altura fue utilizada una variable ficticia (*dummy*) con el fin de diferenciar entre los individuos con y sin observación de altura. Para ello, fue

asignado el valor de 1 a la variable *dummy* cuando los árboles presentaban medición de altura, siendo 0 para aquellos pies en los que no existía dicha observación. Este planteamiento ha sido adoptado con el fin de evitar la pérdida de datos que conllevaría el ajuste de un sistema de ecuaciones con diferente número de observaciones para el diámetro y la altura (Nord-Larsen, 2006), dada la menor frecuencia de medición de alturas en el último inventario realizado en el presente trabajo.

Los datos de crecimiento utilizados en este tipo de modelos suelen presentar una estructura jerárquica debido a la disposición de varias mediciones para un mismo individuo (árbol, parcela o región). Como consecuencia, resulta frecuente la presencia de autocorrelación y por tanto la falta de independencia entre las observaciones (Calama, 2004). La existencia de dicha correlación ha sido ampliamente asociada con el hecho de que datos procedentes de una misma unidad de muestreo (árbol, parcela o región) tienden a parecerse más entre sí que la media (p.e. West, 1981; West *et al.*, 1984; Fox *et al.*, 2001). Existen dos posibles alternativas para tratar de solucionar este inconveniente: la primera consiste en modelizar el término del error mediante la inclusión de una estructura autorregresiva; la segunda se basa en el empleo de modelos mixtos. Puesto que se pretende ajustar las ecuaciones de crecimiento en diámetro y altura de forma simultánea para tener en cuenta la posible relación entre errores, se ha descartado el empleo de modelos mixtos por ser una metodología aún en desarrollo para sistemas de ecuaciones. Por tanto, en el presente estudio ha sido evaluada la posible existencia de autocorrelación, incluyendo una estructura autorregresiva del error en los modelos seleccionados. Para ello, fue realizado el ajuste de los modelos sin expandir el término del error (CAR(0)) y expandiendo dicho término mediante un modelo autorregresivo continuo de primer y segundo orden (CAR(1) y CAR(2), respectivamente). Posteriormente se llevó a cabo un análisis visual de los residuos frente a residuos de diferentes retrasos, correspondientes con cada orden de la estructura del error probada en cada ajuste. Asimismo, para ayudar en la determinación de la existencia de autocorrelación entre los residuos fue estimado el valor del estadístico de Durbin-Watson (*DW*) (Durbin y Watson, 1951) para cada uno de los órdenes de la estructura autorregresiva considerados (CAR(0), CAR(1) y CAR(2)), para un $\alpha = 0,05$. Finalmente, y de acuerdo con los análisis visual y estadístico comentados, se planteó seleccionar el orden más bajo del modelo autorregresivo continuo que permitiera corregir parte de la autocorrelación, sin reducir de forma significativa el tamaño muestral empleado para el ajuste de los modelos de crecimiento seleccionados.

Otro de los aspectos que ha sido destacado en la bibliografía como un problema estadístico para la construcción de modelos de crecimiento de árbol individual es la presencia de heterocedasticidad. De nuevo, son dos las alternativas posibles para

evitar este inconveniente: el uso de regresión ponderada o la transformación de la variable dependiente (habitualmente mediante el empleo de logaritmos). En este estudio se ha empleado la primera alternativa cuando las gráficas de residuos observados frente a valores predichos han indicado una falta de homogeneidad de varianzas.

Evaluación de los modelos

A pesar de que los modelos a determinar en este trabajo presentaban un enfoque explicativo, se decidió realizar igualmente una evaluación de las ecuaciones definidas con el fin de evaluar el comportamiento de las mismas. Para ello, se llevó a cabo un análisis gráfico y estadístico de los mismos. En el primer tipo de análisis se consideró la distribución de los residuos frente a los valores predichos y de los valores observados frente a los predichos, mientras que en el segundo tipo de análisis se atendió a los estadísticos de raíz cuadrada del error medio cuadrático (*REMC* y coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}), cuyo procedimiento de cálculo ha sido descrito ya en el capítulo 2 (apartado 2.6.5.5).

Una vez seleccionados y evaluados los modelos de crecimiento, dado el carácter explicativo de los mismos, y el tamaño de la muestra empleado para su ajuste, no fue considerada su validación. En cualquier caso, y tal y como ya se ha indicado en otros capítulos de la tesis (p.e. capítulos 2 y 4), para evaluar la calidad de las predicciones futuras de un modelo, y en un estudio posterior, resultará recomendable realizar su validación (Lhotka y Loewenstein, 2011), bien mediante un conjunto de datos independiente o bien mediante una validación cruzada (Kozak y Kozak, 2003).

5.2.2.3. Influencia de la poda sobre el estatus social y la producción unitaria del árbol

Para analizar la influencia de la poda sobre el estatus social de los árboles se realizó una evaluación del número y porcentaje de pies pertenecientes a cada clase sociológica (árboles dominantes (clase 1), codominantes (clase 2), intermedios (clases 3 a 6), y dominados o sumergidos (clases 7 y 8)) e intensidad real de poda (severidad de poda agrupada en 15%, 30% y 45%). La clasificación de los árboles por su estatus social fue efectuada para cada uno de los inventarios, de acuerdo con lo explicado en el capítulo 2 (apartado 2.5.3).

Por último, fue evaluada la producción unitaria de cada árbol (v , en m^3) en función de su clase sociológica y severidad de poda. Las ecuaciones empleadas para el cálculo de dicho volumen se encuentran detalladas en el capítulo 2 (apartado 2.5.2). Este análisis fue efectuado tan solo en aquellos árboles en los que no se hubiera producido ningún cambio en el estatus social durante todo el tiempo de estudio transcurrido desde la realización de la poda.

5.3. Resultados y discusión

En este apartado se muestran los resultados obtenidos para el crecimiento en diámetro y altura de cada conífera por separado, tras comprobar la existencia de diferencias significativas en el crecimiento de ambas variables dendrométricas para cada especie ($p < 0,0001$).

5.3.1. Crecimiento individual del árbol en función de la poda

Crecimiento en diámetro en función de la poda

El análisis de varianza (ANOVA) efectuado para el crecimiento corriente en diámetro (*ic_d*) mostró, para cada especie, que los efectos del sitio de ensayo ($p < 0,0001$) y de la severidad de poda ($p < 0,0001$) eran altamente significativos, con interacción entre ambos factores ($p < 0,0001$), siendo también significativa la covariable diámetro normal inicial ($p < 0,0001$). En ambas coníferas fue observado un efecto negativo de la poda sobre el crecimiento corriente en diámetro (*ic_d*). Así, tal y como se muestra en la Figura 5.2, los mayores crecimientos corrientes de esta variable (*ic_d*) fueron observados para el tratamiento de poda más débil (severidad de poda del 15%), siendo el tratamiento de mayor intensidad (severidad de poda del 45%) el que mostró reducir en mayor medida el incremento anual en diámetro. Estas diferencias fueron significativas para las tres severidades de poda evaluadas (15%, 30% y 45%). El resultado obtenido en el presente trabajo, con una mayor reducción del crecimiento diamétrico a mayor intensidad de la poda, ha sido coincidente con otros trabajos previos realizados para diferentes especies forestales. Ejemplo de ello, para algunas especies de coníferas, son los trabajos de Sutton y Crowe (1975), Lange *et al.* (1987) y Neilsen y Pinkard (2003) con *Pinus radiata*, Fassola *et al.* (1999 b;d; 2002b; 2008b) y Amateis y Burkhart (2006; 2010; 2011) con *Pinus taeda*, Endo y Velez-Mesa (1992) con *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham., De Montigny y Stearns-Smith (2001) con *Pseudotsuga menziesii*, o Courdier *et al.* (2002) con *Pinus pinaster*.

Considerando por separado las dos especies estudiadas en el presente trabajo, las reducciones en el crecimiento corriente en diamétrico tras la poda (*ic_d*) fueron algo más notables para *Pinus radiata* que para *Pinus pinaster*, especialmente para el tratamiento de mayor severidad (45%) (Figuras 5.2). Así, durante el período de estudio, el crecimiento corriente en diámetro en *Pinus radiata* se vio reducido un 8% para la severidad de poda del 30% y un 15% para la severidad del 45%, en comparación con el crecimiento corriente de la poda más débil (15%). Estos porcentajes fueron menores para *Pinus pinaster*, que mostró reducciones del incremento anual en diámetro de un 6% y un 9% para los tratamientos de poda del 30% y 45% respecto a la severidad del 15%. Una de las razones por la que las masas

de *Pinus radiata* evaluadas presentaban un menor incremento anual en grosor podría ser la mayor competencia existente entre los pies de la masa, en comparación con las parcelas de *Pinus pinaster* estudiadas. Esto podría indicar, en cierta manera, y tal y como se adelantó en el capítulo 3 de este trabajo, el mayor estado de desarrollo de los rodales de *Pinus radiata* y la recomendación de haber adelantado para esta especie el esquema selvícola planteado.

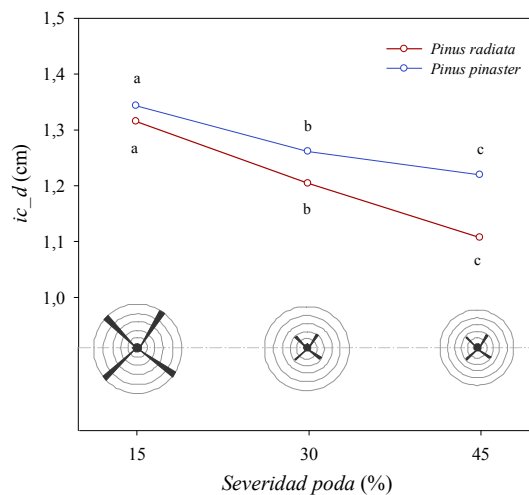


Figura 5.2. Incremento corriente medio para el diámetro (ic_d , cm) de *Pinus radiata* (rojo) y *Pinus pinaster* (azul) en función de la severidad de poda (agrupada en 15%, 30% y 45%), para todo el período de estudio (cuatro años para *Pinus radiata* y cinco años para *Pinus pinaster*). Distintas letras indican diferencias significativas en el test de comparación de medias de Tukey ($\alpha = 95\%$).

El menor crecimiento corriente en diámetro como respuesta a la poda aplicada, fue observado en ambas coníferas desde el primer inventario realizado tres años después de la poda (invierno 2008-2009). Así, al final del período de estudio, el crecimiento acumulado medio en diámetro para ambas especies tendió a ser inferior a mayor severidad del tratamiento (Figura 5.3). De esta manera, la intervención más débil (15%) mostró, por lo general, el mayor crecimiento acumulado (ia_d) mientras que la poda más severa fue la que tuvo habitualmente el menor incremento acumulado de esta variable (ia_d). Las diferencias de crecimiento entre tratamientos fueron menores para las severidades de poda del 15% y 30% que en el caso de estas intensidades con la poda del 45%, observando las mayores diferencias para el crecimiento acumulado en la poda más débil (15%) y en la poda más severa (45%).

Por otra parte, la Figura 5.3 muestra las diferentes respuestas a los tratamientos en cada uno de los sitios evaluados. Así, por ejemplo, para las parcelas de *Pinus radiata*, las diferencias en el crecimiento acumulado en los árboles podados con severidades del 15% y 30% fueron prácticamente insignificantes en el monte de Cabada (0,51% para el último inventario), siendo mucho más notables en el resto de parcelas (7% para La Campa, 11% para Santa Catalina y 12% para Fabal). Asimismo, la reducción del crecimiento acumulado en diámetro (ia_d) en el

tratamiento de poda del 45% con respecto a la intensidad del 15% varió desde un 10% para Cabada hasta un 17% para Fabal. En los sitios de ensayo de *Pinus pinaster* el incremento acumulado de esta variable (ia_d) se vio menos reducido que en el caso de *Pinus radiata* (2-5% para la poda del 30% con respecto al 15% y de 2-9% para la poda del 45% en relación con el 15%).

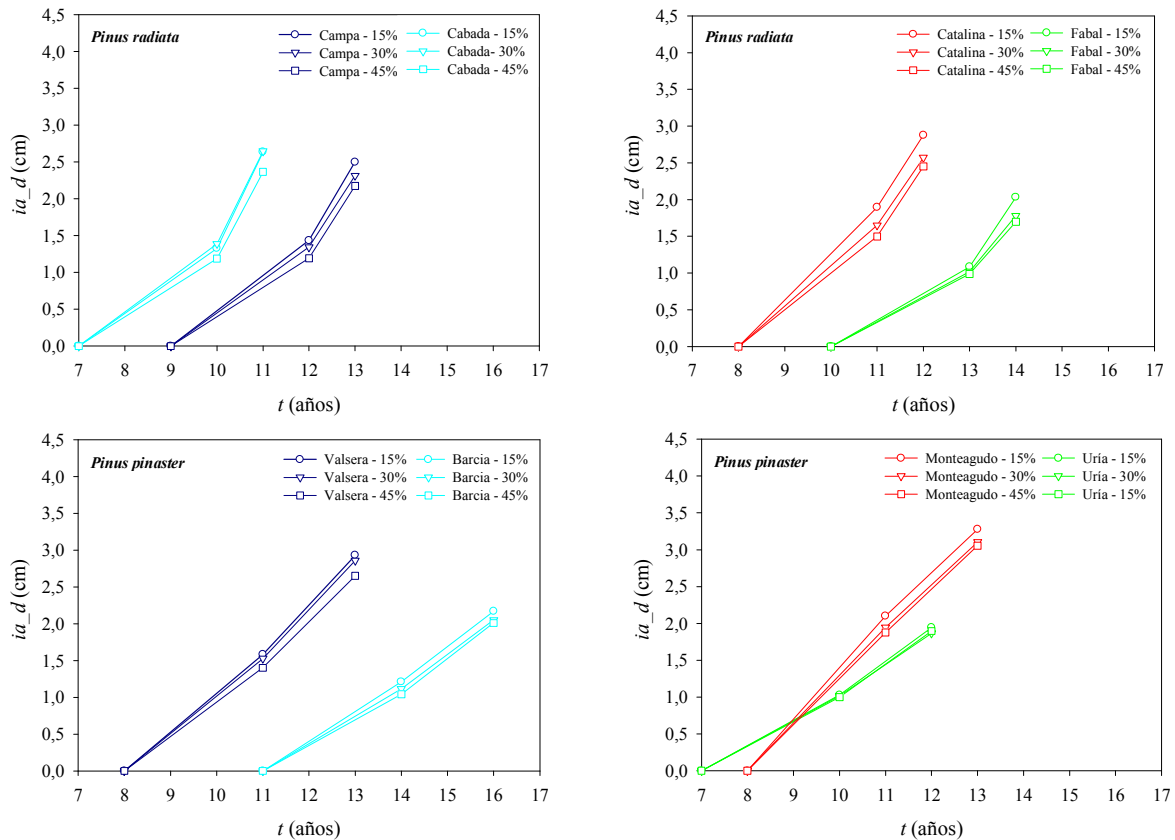


Figura 5.3. Incremento acumulado medio para el diámetro (ia_d , cm) en cada inventario y parcela de ensayo de *Pinus radiata* (fila superior) y *Pinus pinaster* (fila inferior) en función de la severidad de poda aplicada en cada árbol (agrupada en 15%, 30% y 45%) frente a la edad del rodal.

Neilsen y Pinkard (2003) evaluaron también el crecimiento diamétrico del árbol en función del porcentaje de altura eliminada, diferenciando intensidades del 45%, 60% y 75% para la segunda y tercera intervención de poda, siendo realizada una primera intervención con una intensidad del 45%, que fue considerada como tratamiento control. En dicho estudio, llevado a cabo en una masa joven de *Pinus radiata* en Tasmania, fue obtenido igualmente un menor crecimiento diamétrico de los árboles a mayor intensidad del tratamiento. Asimismo, en dicho trabajo, fue observada una disminución del efecto de la poda con el tiempo para la intensidad de poda del 45%, no siendo atenuado dicho efecto en el caso de las intervenciones del 60% y 75% tras seis años de estudio. En dicho trabajo, fue observado también un mayor efecto de la poda a partir de la segunda intervención. Por ello, Neilsen y Pinkard (2003) recomendaron evaluar el efecto del tratamiento para cada una de las intervenciones realizadas en una masa, seleccionando finalmente la intensidad de

poda del 45% de la altura del árbol para *Pinus radiata* en Tasmania (correspondiente con la eliminación del 20% de longitud de la copa), por tratarse de una intensidad adecuada para minimizar el efecto de la poda sobre el crecimiento diamétrico del árbol y obtener una cantidad suficiente de madera de calidad. Dado que las recomendaciones efectuadas por Nielsen y Pinkard (2003) se realizaron tras la segunda y tercera intervención de poda, la realización de la segunda fase experimental en este trabajo podrá aportar mayor información sobre la intensidad del tratamiento más adecuada para minimizar el efecto negativo sobre el crecimiento de las especies estudiadas y obtener una mejor calidad de la madera, corroborando los resultados de esta tesis para *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* en el área atlántica.

En Nueva Zelanda, trabajos como los de Maclaren, (1993) y Meyers (1995) para *Pinus radiata*, han definido la intensidad de poda en función de la longitud de copa remanente tras la intervención, indicando que un valor de copa de 3-4 metros tras la poda permite evitar reducciones significativas en el crecimiento del árbol podado. Atendiendo a estas indicaciones, y considerando la longitud de copa remanente de cada árbol para las parcelas estudiadas en el presente trabajo, se observó un mayor incremento anual medio en diámetro a mayor longitud de copa, siendo mayor la influencia de la poda sobre el engrosamiento de los árboles de *Pinus radiata* que en el caso de *Pinus pinaster*. Así, tal y como se puede observar en la Figura 5.4, en las parcelas evaluadas en este estudio no parece recomendable realizar podas que supongan dejar menos de 4 metros de longitud de copa tras la intervención, dada la importante reducción que supondría sobre el crecimiento anual en diámetro (ic_d), especialmente para el caso de *Pinus radiata*.

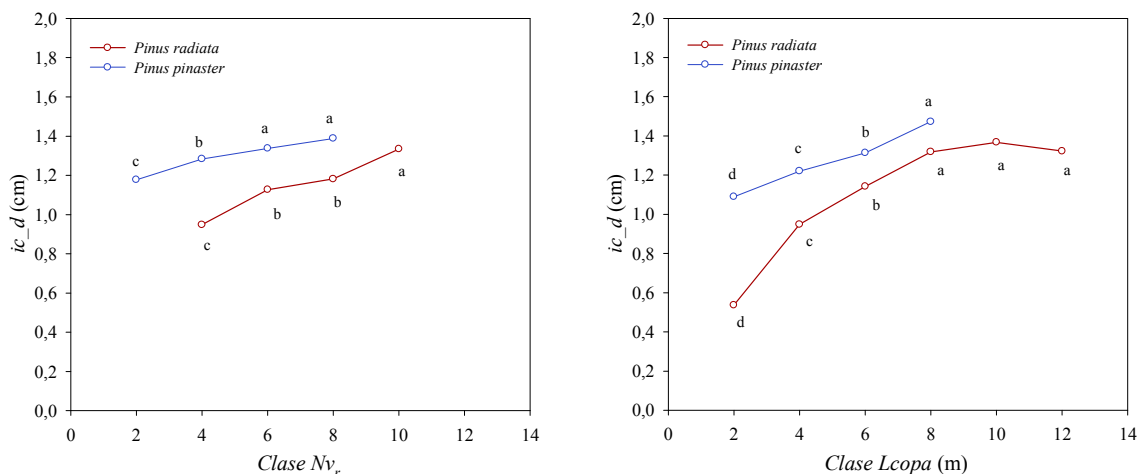


Figura 5.4. Incremento corriente medio en diámetro (ic_d , cm), para cada clase de número de verticilos de la copa remanente (Nv_r) (izquierda) y de longitud de copa (L_{copa} , m) (derecha), en *Pinus radiata* (rojo) y *Pinus pinaster* (azul). Distintas letras indican distintos grupos en el test de comparación de medias de Tukey ($\alpha = 95\%$).

En la figura anterior se muestra también la relación existente entre la longitud de copa remanente y el crecimiento corriente en diámetro. Para *Pinus pinaster* no han

sido encontrados estudios que relacionen la altura relativa podada o la longitud de copa remanente con el crecimiento posterior del árbol. En realidad, son escasos los trabajos que han evaluado el efecto de la poda sobre el crecimiento de esta especie. Quizá una de las pocas investigaciones publicadas en esta temática para dicha conífera sea la de Courdier *et al.* (2002), en donde fue evaluada la influencia de la poda en el crecimiento de una masa joven de *Pinus pinaster* en Las Landas. En dicho trabajo, la intensidad de poda fue definida como el número de verticilos remanentes tras la intervención, observando un menor crecimiento corriente medio en diámetro a mayor intensidad del tratamiento durante los años sucesivos a la poda. Sin embargo, en ese caso, el efecto negativo de la poda sobre el crecimiento diamétrico del árbol acabó desapareciendo a los tres años de la intervención para los tratamientos en los que se habían dejado al menos 3 verticilos verdes en la copa remanente, siendo el tratamiento control y la poda más débil (4 verticilos verdes tras la poda) los únicos que no mostraron una reducción significativa de su crecimiento después de la poda. De acuerdo con esos resultados, Courdier *et al.* (2002) recomendaron no dejar menos de 3 verticilos verdes tras la poda (equivalentes a eliminar hasta un 46% de la copa verde) destacando como aconsejable dejar 4 verticilos vivos después de la intervención (equivalente a eliminar hasta un 33% de la copa verde). Atendiendo a este criterio de poda, y considerando el número de verticilos remanentes después de la intervención realizada en el presente estudio, el crecimiento anual en diámetro de los árboles se vio reducido de forma significativa para ambas especies cuando el número de verticilos verdes era menor a 10 en *Pinus radiata* y 6 en *Pinus pinaster*, siendo especialmente significativa la reducción producida para intensidades de poda en las que se dejaban 4 o menos verticilos (Figura 5.4). Según De Montigny y Stearns-Smith (2001) cada verticilo del árbol va a contribuir claramente en la copa, llegando a ser mucho más vulnerables a eliminaciones excesivas de la copa los árboles jóvenes, especialmente para tratamientos de poda definidos hasta una altura fija. En cualquier caso, y como ya se ha visto en el capítulo 3, el criterio de definición de la intensidad de poda en base al número de verticilos resultó ser menos preciso que la altura, especialmente para *Pinus radiata*.

En la Figura 5.4 se puede confirmar el mayor crecimiento corriente medio para el diámetro de *Pinus pinaster* con respecto a *Pinus radiata*.

Por último, y dada la importancia que se le ha dado a la longitud de la copa en relación con el crecimiento del árbol en otros trabajos, fue evaluada la relación existente entre la longitud de copa remanente media y el crecimiento medio acumulado en diámetro durante el período de estudio (cuatro años para *Pinus radiata* y cinco años para *Pinus pinaster*). Tal y como se esperaba para las dos especies estudiadas, se observó cierta tendencia entre la menor longitud de copa remanente media (L_{copam}), coincidente por lo general con la mayor severidad de

poda, y el menor crecimiento medio acumulado en diámetro (ia_d) (Figura 5.5). Este resultado fue observado para cada parcela y especie.

Asimismo, la Figura 5.5 muestra nuevamente las diferencias existentes para cada sitio de estudio. En esta figura, al igual que en la Figura 5.3, se observa un menor crecimiento para la parcela de *Pinus pinaster* situada en el monte de Uría, en donde el crecimiento fue menor para el período evaluado. Este resultado podría ser debido al problema sanitario ocurrido en dicho monte durante el tiempo de estudio, y que podría haber motivado la ralentización del crecimiento diamétrico después de la intervención.

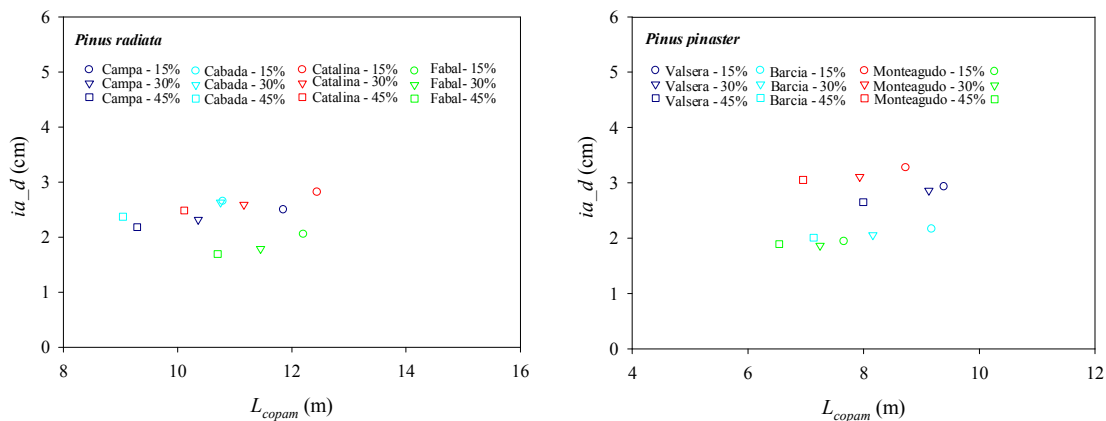


Figura 5.5. Relación entre la longitud de la copa remanente media en el último inventario realizado tras la poda (L_{copam} , m) y el incremento acumulado medio en diámetro (ia_d , cm), para cada parcela de ensayo de *Pinus radiata* (izquierda) y *Pinus pinaster* (derecha), en función de la severidad de poda aplicada (agrupada en 15%, 30% y 45%) durante todo el período de estudio.

Esta misma relación fue evaluada por Neilsen y Pinkard (2003) para *Pinus radiata* en Tasmania, observando igualmente un menor crecimiento acumulado en diámetro para los menores valores medios de longitud de copa remanente (L_{copam}), y viceversa. De igual forma, Neilsen y Pinkard (2003) obtuvieron menores valores de L_{copam} para los tratamientos de mayor intensidad de poda (60% y 75% de altura total eliminada) y viceversa, observando que la relación existente entre el valor medio de ic_d y L_{copam} tenía una tendencia curvilínea positiva. De acuerdo con Pinkard *et al.* (2004), la forma curvilínea sugiere que los árboles tienen una reserva de carbono que permite mantener el crecimiento tras la defoliación asociada a la poda (Cannell y Dewar, 1994), mientras que si esta relación fuese lineal significaría que los árboles no tendrían suficientes reservas para mantener dicho crecimiento. En nuestro caso, deberíamos contar con al menos un cuarto inventario para definir con mayor exactitud el tipo de relación existente entre estas variables. Además, tal y como ya se ha indicado, la consideración de un período de estudio más amplio permitirá apreciar la recuperación del crecimiento para los diferentes tratamientos de poda aplicados, así como el efecto que tendrán la poda alta y la clara, correspondientes con la segunda fase experimental de los ensayos.

Crecimiento en altura en función de la poda

El crecimiento corriente en altura en los años sucesivos a la intervención de poda no se vio afectado de la misma manera que el diámetro. En ambas especies hubo un efecto del sitio de ensayo ($p < 0,0001$) y de su interacción con la severidad de poda ($p = 0,0473$ para *Pinus radiata* y $p = 0,0085$ para *Pinus pinaster*), así como del tratamiento de poda para *Pinus radiata* ($p = 0,0150$) para los tratamientos de poda del 30% y 45% ($p = 0,0107$). Para *Pinus pinaster*, la poda no afectó significativamente al crecimiento en altura ($p = 0,6497$). Como era de esperar, la covariable altura total inicial ($p < 0,0001$) resultó ser significativa para ambas coníferas.

En la Figura 5.6 se muestra gráficamente la tendencia de los crecimientos medios anuales en altura (ic_h) para ambas especies, siendo evidente la falta de efecto significativo de la poda sobre dicho crecimiento. Comparativamente, y aunque no fue una reducción significativa, este incremento anual en altura (ic_h) fue inferior para *Pinus pinaster* que para *Pinus radiata*.

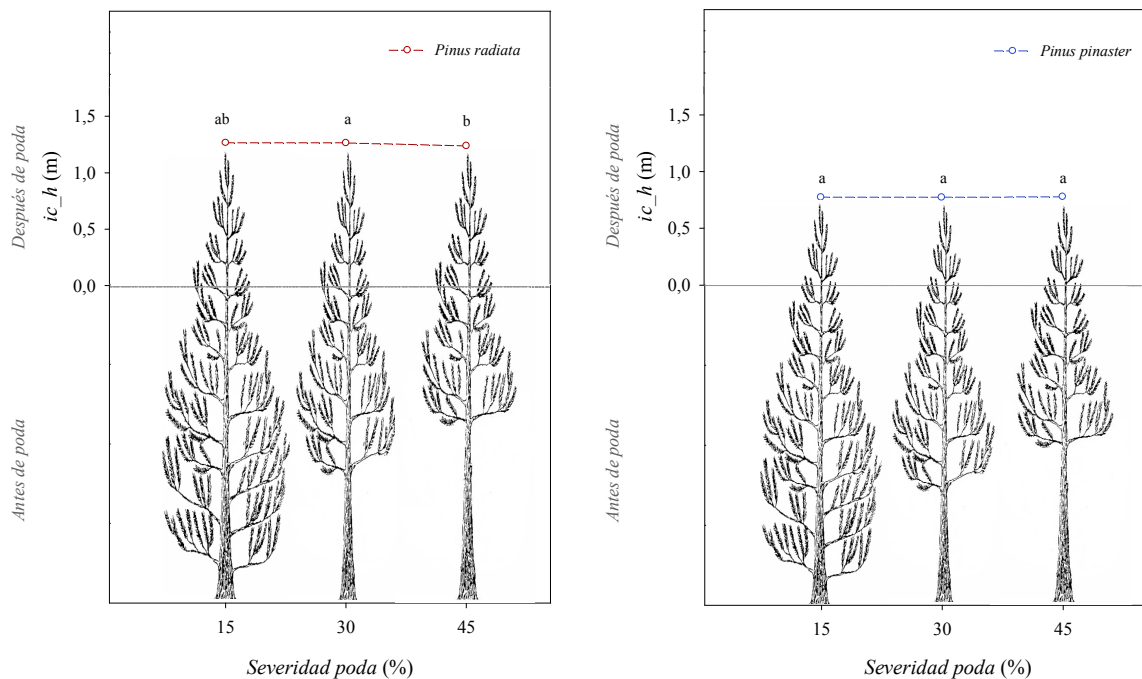


Figura 5.6. Crecimiento corriente medio en altura (ic_h , m) para *Pinus radiata* (línea roja, izquierda) y *Pinus pinaster* (línea azul, derecha), en función de la severidad de poda aplicada (agrupada en 15%, 30% y 45%), para todo el periodo de estudio. Distintas letras indican distintos grupos en el test de comparación de medias de Tukey ($\alpha = 95\%$).

La representación del crecimiento medio acumulado en altura (ia_h), para cada parcela de ensayo e intensidad de poda (Figura 5.7) confirma también la falta de un efecto significativo en el incremento anual de esta variable (ia_h) en relación con el tratamiento de poda efectuado. Por lo general, el valor de ia_h fue menor a mayor severidad de poda, excepto Fabal para *Pinus radiata* y Valsera para *Pinus pinaster*, que mostraron un mayor valor de ia_h a mayor intensidad del tratamiento

(incremento medio del 5% para la severidad del 30% y del 7% para la severidad del 45% con respecto al tratamiento del 15% en ambos ensayos). Este efecto positivo de la poda podría estar asociado con la eliminación de una parte importante de ramas secas o muertas, con baja actividad fotosintética, dada la mayor proporción de verticilos secos o muertos en el momento previo a la poda para ambos ensayos en relación con el resto de parcelas estudiadas.

De todas las severidades de poda evaluadas, las mayores diferencias en el crecimiento se observaron para el tratamiento del 45% en ambas coníferas (parcela de Valsera para *Pinus pinaster*, con diferencia de 0,12 metros de altura y parcela de Santa Catalina para *Pinus radiata* con 0,11 metros de altura).

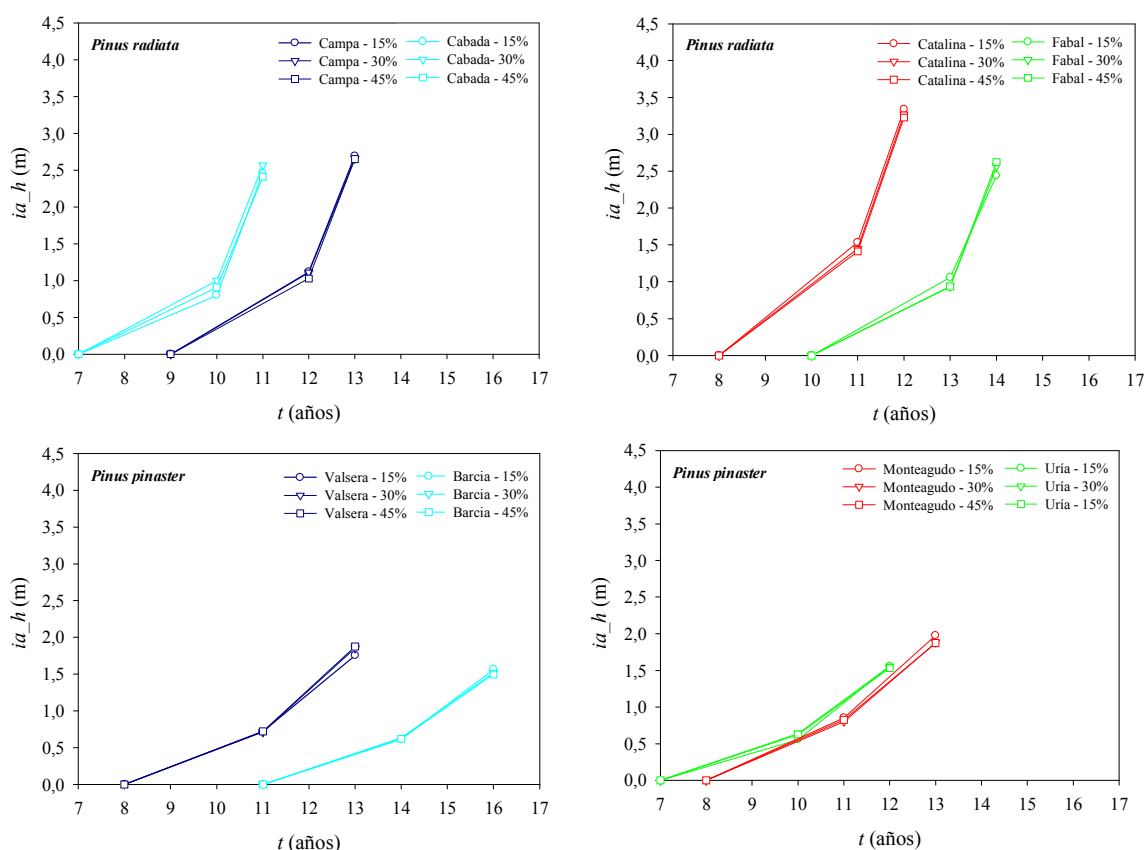


Figura 5.7. Incremento medio acumulado para la altura (ia_h , m) de los árboles de *Pinus radiata* (arriba) y *Pinus pinaster* (abajo) en función de la severidad de poda aplicada (agrupada en 15%, 30% y 45%) en cada parcela de ensayo.

De acuerdo con lo mostrado en este subapartado, la eliminación de una parte de la copa no tiene porqué afectar significativamente al crecimiento en altura. Esto ha sido explicado por Amateis y Burkhart (2010) en base a la capacidad del árbol podado para obtener recursos suficientes que permitan mantener su crecimiento en altura a pesar de la eliminación de una parte de su capacidad fotosintética. En cualquier caso, otros autores han publicado que el incremento en altura también puede verse afectado de forma significativa por la poda, especialmente cuando los tratamientos

son efectuados con mayor severidad. Así, por ejemplo, para el trabajo de Neilsen y Pinkard (2003) con *Pinus radiata* se observó una reducción significativa de la altura para intensidades de poda en las que se eliminaba el 75% de la altura total del árbol. Para el caso de *Pinus pinaster* Courdier *et al.* (2002) observaron también una reducción significativa del crecimiento en altura en los tratamientos de poda en los que se eliminaba el 61% de la copa verde, dejando tan solo 2 verticilos vivos.

Crecimiento en diámetro y altura en función de la poda

Tal y como se ha visto en los subapartados anteriores, los árboles podados mostraron una mayor sensibilidad al tratamiento para el crecimiento en diámetro que en altura en las dos coníferas evaluadas. Si bien es cierto que algunos trabajos previos han observado una reducción significativa del incremento de ambas variables dendrométricas (*d* y *h*) tras la poda (p.e. Sutton y Crowe, 1975; Majid y Paudyal, 1992; De Montigny y Stearns-Smith, 2001; Courdier *et al.*, 2002; Pinkard *et al.*, 2004; Orozco y Jordán, 2011), dichos resultados han estado habitualmente asociados con intensidades excesivas del tratamiento, siendo más frecuente que la reducción del crecimiento se produzca de forma significativa tan solo para el diámetro (p.e. Sutton y Crowe, 1975; Långström y Hellqvist, 1991; O'Hara, 1991; Endo y Velez-Mesa, 1992; Majid y Paudyal, 1992; Pinkard y Beadle, 1998b; Zeng, 2001; Neilsen y Pinkard, 2003; Nutto y Touza, 2004; Amateis y Burkhardt, 2010; 2011).

La diferente respuesta del crecimiento en diámetro y altura tras la poda ha sido asociada, en su mayoría, con la dinámica de los carbohidratos en el árbol (p.e. Lanner, 1985; Cannell y Dewar, 1994; Neilsen y Pinkard, 2003; Amateis y Burkhardt, 2010; 2011). Así, según Amateis y Burkhardt (2010), estas diferencias se deben a una redistribución del crecimiento tras la intervención de poda que ocurre en dos fases, con un crecimiento inicial en la copa y un crecimiento posterior en diámetro. De acuerdo con estos autores, este orden de prioridad en el reparto del crecimiento del árbol respondería a la fuerza relativa de los sumideros u órganos netamente consumidores de recursos, situados en las zonas meristemáticas del crecimiento. De esta manera, y tal y como ya habían apuntado previamente Waring y Schlesinger (1985), las necesidades de los meristemas apicales para el incremento en altura serían satisfechas con anterioridad a las de los meristemas secundarios responsables del incremento en grosor. Así, según Amateis y Burkhardt (2011) el árbol podado respondería favoreciendo el crecimiento en altura a expensas del crecimiento en diámetro, presumiblemente para mantener la dominancia y la posición de la copa en la masa mientras recupera su capacidad fotosintética.

Otros autores han explicado estas diferencias en el crecimiento en diámetro y altura de los árboles podados, en base a los meristemas afectados en la operación. En este caso, el crecimiento estaría limitado por la cantidad de meristemas

disponibles (Geber, 1990) y el tipo de meristemo eliminado en la poda (Zeng, 2001). Así, de acuerdo con Zeng (2001), el incremento en diámetro tras la poda se vería más afectado que la altura por el hecho de eliminar meristemos secundarios en el árbol sin intervenir sobre el meristemo apical del mismo.

Por otra parte, algunos trabajos han observado que la poda no tenía ningún efecto sobre el crecimiento en diámetro y altura del árbol o incluso que dicho efecto era positivo para el diámetro, la altura o para ambas variables dendrométricas (Aunós, 1991; Cown, 1992; Davel y Sepúlveda, 2000; Schoelzke, 2003; Muñoz *et al.*, 2005; Cyr, 2006). Este tipo de respuesta a la poda ha sido asociado habitualmente con intensidades del tratamiento moderadas, en las que se eliminan principalmente ramas muertas o suprimidas con balance fotosintético neto negativo, las cuales no están contribuyendo al crecimiento del tronco (Larson, 1963; Montoya, 1996). Por lo general, este tipo de ramas se encuentran situadas en la parte inferior del fuste, estando asociada su aparición con la menor entrada de luz en la copa. Así, por ejemplo, trabajos como el de Pinkard y Beadle (1998b), para *Eucalyptus nitens*, reportaron que la poda de hasta un 50% de la copa viva no influía negativamente en el crecimiento del árbol si las ramas bajas eliminadas tenían poco acceso a la luz.

Se debe destacar también que aun tratándose de la misma especie y rango de edad, y para una misma gestión selvícola, el crecimiento de los árboles tras la poda puede mostrar diferencias apreciables para las distintas condiciones de desarrollo de la masa. Esto es así por la capacidad de adaptación del árbol y la respuesta del mismo a los cambios que se producen en el ambiente que le rodea (Gadow *et al.*, 2001), lo que se traduce en modificaciones en su pauta de crecimiento (Mitscherlich, 1971; 1975, cit. por Gadow *et al.*, 2001; Raven *et al.*, 1987). Así, tal y como se ha visto en los subapartados anteriores, la respuesta del crecimiento en diámetro y altura tras la poda mostró diferencias para los distintos sitios evaluados en este trabajo (Figuras 5.3, 5.5 y 5.7). En general, dichas diferencias podrían ser debidas no solo a las condiciones del sitio (p.e. propiedades del suelo, características fisiográficas, condiciones climáticas, etc.), sino también a las propias características de la masa en el momento de la intervención (especialmente la edad, el estado sanitario de la masa y la densidad del rodal), y a las características genéticas del material forestal de reproducción. Asimismo, la interacción genotipo-ambiente presenta un papel determinante en el desarrollo de las masas. Existen por tanto muchos factores de variabilidad en el proceso de crecimiento del árbol que no han podido ser evaluados en el presente trabajo, muchos de los cuales van a condicionar de forma conjunta el crecimiento. Por ello, es importante tener la precaución de considerar unas pautas de intervención (momento, frecuencia e intensidad de la poda) que al menos sean acordes con la especie (p.e. Pinkard y Beadle, 1998 a;b; Pinkard *et al.*, 2004), el tipo de masa y las condiciones de crecimiento,

especialmente la densidad del rodal, la calidad del sitio y la competencia existente sobre los pies podados.

5.3.2. Modelo explicativo del crecimiento individual del árbol considerando la intensidad de poda y otras variables relacionadas con el crecimiento

Atendiendo a los resultados del apartado anterior se planteó el desarrollo de modelos de crecimiento en diámetro y altura, para cada especie (*Pinus radiata* y *Pinus pinaster*), considerando diversos factores reguladores del crecimiento: tamaño y edad del árbol, severidad de poda, variables de masa e índices de competencia. Con ello, se trató de explicar el crecimiento individual de los árboles podados de estas coníferas bajo distintas intensidades de poda y condiciones de crecimiento. Las variables de masa y los índices de competencia finalmente utilizados fueron seleccionados en función de su facilidad de obtención en campo y su simplicidad para el entendimiento del modelo, siempre que además mostraran un buen comportamiento en las funciones de crecimiento desarrolladas.

En una fase inicial se ajustaron las Ecuaciones 5.3 y 5.4 en las que el factor edad afecta al crecimiento de forma potencial o exponencial, respectivamente. No se observaron grandes diferencias en los ajustes, aunque el modelo potencial ($y_2 = y_1 + k_1 \cdot y^p \cdot t_1^q \cdot \Delta t$) mostró resultados ligeramente mejores, siendo por ello seleccionado para un análisis más detallado.

Los factores reguladores del crecimiento antes comentados, y que no forman parte de la expresión original del modelo (severidad de poda, variables de masa e índices de competencia), fueron incluidos en el modelo al expandir el término de ponderación k_1 . En el caso del modelo de crecimiento en altura, como variable y relacionada con el tamaño del árbol se ha empleado tanto la altura del árbol al inicio del período de crecimiento (valor lógico) como el diámetro de partida.

Los modelos de cada especie fueron ajustados inicialmente por separado para cada variable dependiente (diámetro y altura) y sin expandir el término del error CAR(0), observando, en todos los casos, la existencia de una cierta autocorrelación, tanto en su evaluación numérica como gráfica. Por ello, se reajustaron los modelos incluyendo estructuras autorregresivas de primer y segundo orden (CAR(1) y CAR(2)) (Tabla 5.2). Dado que la inclusión de estructuras autorregresivas no mostraba en ningún caso corregir el problema de autocorrelación, y que el objetivo fundamental de los modelos no es realizar inferencia estadística, se planteó el ajuste de los modelos de crecimiento de árbol individual sin incluir ningún tipo de estructura del error, al considerar que esta decisión permitiría explicar igualmente la respuesta en el crecimiento de los árboles podados teniendo en cuenta otros factores determinantes en dicho proceso.

Tabla 5.2. Estadístico de Durbin-Watson (*DW*) para un $\alpha = 0,05$ en función del orden de la estructura de autocorrelación autoregresiva continua.

Especie	Variable modelizada	CAR(0)	CAR(1)	CAR(2)
<i>Pinus radiata</i>	<i>Diámetro</i>	1,55	1,68	1,75
	<i>Altura</i>	1,52	1,68	1,78
<i>Pinus pinaster</i>	<i>Diámetro</i>	1,02	1,31	1,55
	<i>Altura</i>	1,40	1,69	1,85

donde CAR(0) se corresponde con el ajuste sin estructura autoregresiva, y CAR(1) y CAR(2) son las estructuras autoregresivas de primer y segundo orden incluidas en el ajuste de los modelos seleccionados.

Posteriormente, para cada especie, se ajustaron simultáneamente los modelos de diámetro y altura con diferentes combinaciones de factores en la expansión del término de ponderación. En la Tabla 5.3 se muestran los parámetros estimados en dicho ajuste simultáneo. Todos los parámetros resultaron, por lo general, altamente significativos ($p < 0,0001$), siendo tan solo no significativo el parámetro q_2 que acompaña a la edad de proyección (t_1) del modelo de incremento en altura de *Pinus pinaster*.

Tabla 5.3. Estimación de los parámetros del ajuste simultáneo de las ecuaciones de crecimiento individual en diámetro y altura en *Pinus radiata* y *Pinus pinaster*.

Especie	Variable modelizada	Parámetro	Estimación	Error estándar asintótico	t Valor	Prob> t
<i>Pinus radiata</i>	<i>Diámetro</i>	a_1	0,8353	0,0354	23,58	<0,0001
		a_{11}	-0,0529	0,0197	-2,68	0,0073
		a_2	-0,3863	0,0165	-23,47	<0,0001
		a_3	0,6244	0,0388	16,09	<0,0001
		p_1	-0,3781	0,0380	-9,96	<0,0001
		q_1	0,9293	0,0299	31,12	<0,0001
	<i>Altura</i>	b_1	0,6028	0,0226	26,65	<0,0001
		b_2	-0,0852	0,0100	-8,51	<0,0001
		b_3	0,0427	0,0114	3,74	0,0002
		p_2	0,0779	0,0165	4,73	<0,0001
		q_2	0,1476	0,0218	6,77	<0,0001
<i>Pinus pinaster</i>	<i>Diámetro</i>	a_1	4,6174	0,4733	9,75	<0,0001
		a_{11}	-1,9971	0,2492	-8,01	<0,0001
		a_2	-0,1596	0,0313	-5,09	<0,0001
		a_3	0,1436	0,0686	2,09	0,0364
		p_1	0,3688	0,0680	5,42	<0,0001
	<i>Altura</i>	b_1	0,9034	0,0398	22,67	<0,0001
		b_2	0,4358	0,0154	28,33	<0,0001

Tabla 5.3 (continuación). Estimación de los parámetros del ajuste simultáneo de las ecuaciones de crecimiento individual en diámetro y altura en *Pinus radiata* y *Pinus pinaster*.

Especie	Variable modelizada	Parámetro	Estimación	Error estándar asintótico	t Valor	Prob> t
<i>Pinus pinaster</i>	Altura	b_3	0,4487	0,0150	29,91	<0,0001
		p_2	-0,3766	0,0168	-22,47	<0,0001
		q_2	-0,0304	0,0225	-1,35	0,1770
		q_1	-0,7815	0,0259	-30,21	<0,0001

donde Prob>|t| es el valor de significación del parámetro estimado; a_i , b_i , p_i y q_i son los parámetros estimados para los modelos de crecimiento individual en diámetro y altura del árbol.

En la Tabla 5.4 se recogen los valores de los estadísticos de bondad de ajuste ($REMC$ y R^2_{adj}) correspondientes con cada una de las ecuaciones de crecimiento desarrolladas para cada especie.

Tabla 5.4. Estadísticos de bondad de ajuste de los modelos de crecimiento en diámetro y altura resultantes del ajuste simultáneo de ambas variables para *Pinus radiata* y *Pinus pinaster*.

Especie	Variable modelizada	$REMC$	R^2_{adj}
<i>Pinus radiata</i>	Diámetro	1,3049	0,9068
	Altura	1,0430	0,8526
<i>Pinus pinaster</i>	Diámetro	1,2312	0,8815
	Altura	0,7269	0,8419

donde $REMC$ es la raíz cuadrada del error medio cuadrático; y R^2_{adj} es el coeficiente de determinación ajustado.

De acuerdo con la tabla anterior, los modelos definidos para las dos especies objeto de estudio han mostrado explicar un alto porcentaje de la variación producida en el incremento individual en diámetro y altura de los árboles podados, siendo mayor el total de la varianza explicado para el crecimiento en diámetro que en altura. Asimismo, de forma comparativa, los modelos determinados para *Pinus radiata* mostraron explicar un porcentaje de la varianza ligeramente superior a los de *Pinus pinaster*. El valor del $REMC$ fue menor para los modelos de incremento en altura en ambas especies, siendo a su vez inferior su valor para los modelos de *Pinus pinaster* con respecto a los de *Pinus radiata*. Estos resultados coinciden con diversos trabajos donde los modelos de crecimiento en altura resultaron peores para diversas especies forestales y condiciones de crecimiento (p.e. Hasenauer y Monserud, 1997; Mabvurira y Miina, 2002; Palahí *et al.*, 2003; Palahí y Grau, 2003; Trasobares *et al.*, 2004 a;b; Crecente-Campo, 2008).

Las expresiones finales de los modelos explicativos determinados en este trabajo para definir el crecimiento individual en diámetro y altura de árboles jóvenes podados de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* en Asturias, han sido (Tabla 5.5):

Tabla 5.5. Ecuaciones de incremento en diámetro y altura ajustadas simultáneamente para árboles podados de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster*.

Especie	Variable modelizada	Modelo	
<i>Pinus radiata</i>	Diámetro	$d_2 = d_1 + k_{1d} \cdot d_1^{-0,3781} \cdot t_1^{0,9293} \cdot \Delta t$, con $k_{1d} = (0,8353 - 0,0529 \cdot hcr) \cdot G_1^{-0,3863} \cdot Rd_{g1}^{0,6244}$	(5.5)
	Altura	$h_2 = I \cdot (h_1 + k_{1h} \cdot d_1^{0,0779} \cdot t_1^{0,1476} \cdot \Delta t)$, con $k_{1h} = 0,6028 \cdot G_1^{-0,0852} \cdot Rd_{g1}^{0,0427}$	(5.6)
<i>Pinus pinaster</i>	Diámetro	$d_2 = d_1 + k_{1d} \cdot d_1^{0,3688} \cdot t_1^{-0,7815} \cdot \Delta t$, con $k_{1d} = (4,6173 - 1,9971 \cdot hcr) \cdot G_1^{-0,1596} \cdot Rd_{g1}^{0,1436}$	(5.7)
<i>Pinus pinaster</i>	Altura	$h_2 = I \cdot (h_1 + k_{1h} \cdot d_1^{-0,3766} \cdot t_1^{-0,0304} \cdot \Delta t)$, con $k_{1h} = 0,9034 \cdot G_1^{0,4358} \cdot Rd_{g1}^{0,4487}$	(5.8)

donde d_2 es el diámetro normal del árbol a la edad t_2 , en cm; d_1 es el diámetro normal del árbol a la edad t_1 , en cm; Δt es el intervalo de tiempo considerado para el incremento en diámetro y/o altura, en años. Comprende desde la edad inicial de proyección t_1 hasta la edad proyectada t_2 ; hcr es la altura de copa relativa del árbol en el momento de la poda, correspondiente con la severidad real de poda, en tanto por uno; G_1 es el área basimétrica de la parcela a la edad t_1 , en m^2/ha ; Rd_{g1} es el ratio entre el diámetro normal del árbol y el diámetro medio cuadrático de la parcela a la edad t_1 , indicador de competencia independiente de la distancia; h_2 es la altura total del árbol a la edad t_2 , en m; h_1 es la altura total del árbol a la edad t_1 , en m; I es una variable *dummy*, con $I = 1$ si $h_1 \neq 0$ (con dato de h_1), 0 para el resto de los casos (sin dato de h_1); y k_{1d} y k_{1h} son los términos de ponderación empleados en las ecuaciones de predicción del diámetro (d_2) y la altura (h_2), respectivamente.

En las Figuras 5.8 y 5.9 se muestran los gráficos de residuos frente a residuos de una observación anterior correspondientes con los modelos de incremento en diámetro (izquierda) y altura (derecha) definidos para *Pinus radiata* (Figura 5.8) y para *Pinus pinaster* (Figuras 5.9), en los que no se incluye ninguna estructura de error autorregresiva.

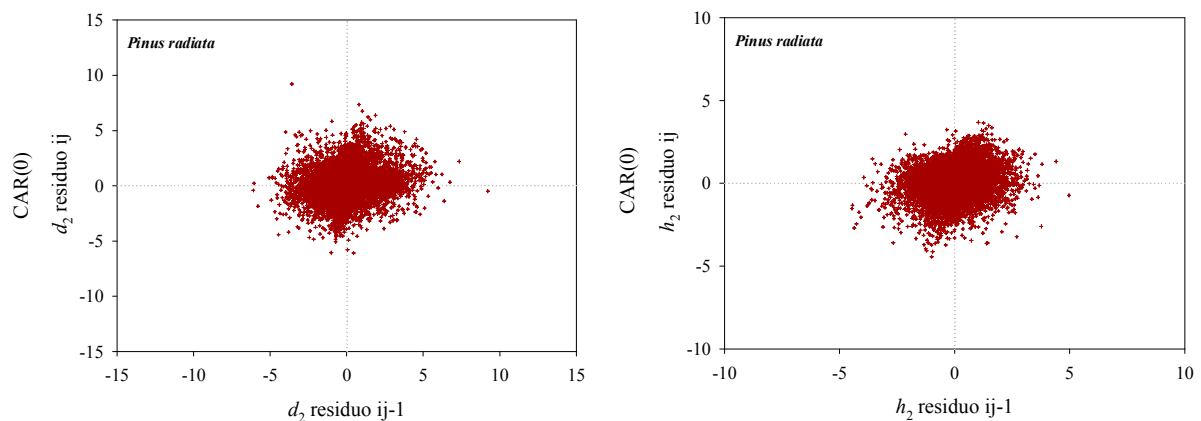


Figura 5.8. Gráficos de residuos frente a residuos con un retraso de los modelos de crecimiento en diámetro (izquierda) y altura (derecha) de *Pinus radiata*.

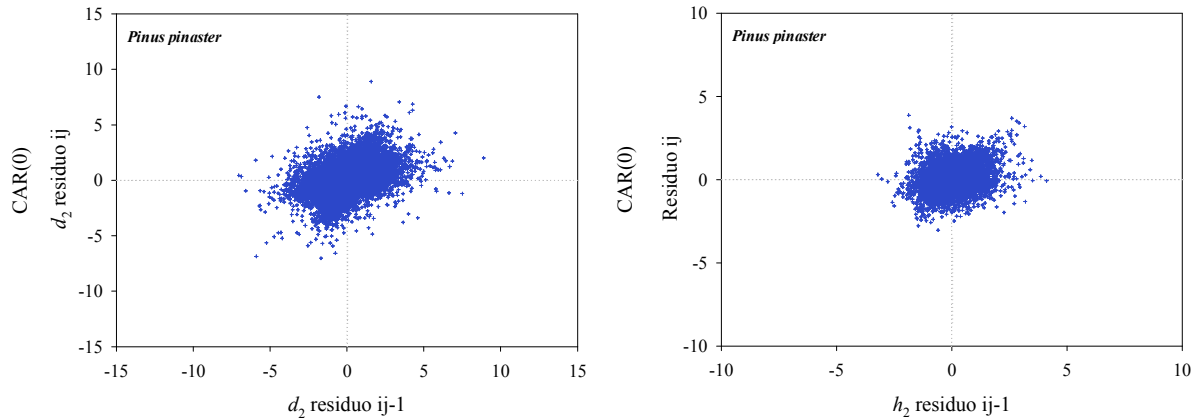


Figura 5.9. Gráficos de residuos frente a residuos con un retraso de los modelos de crecimiento en diámetro (izquierda) y altura (derecha) de *Pinus pinaster*.

En las Figuras 5.10 y 5.11 se representan los valores observados frente a los predichos, así como los residuos frente a los predichos obtenidos con los modelos ajustados para el incremento en diámetro y altura de ambas especies (Figura 5.10 para *Pinus radiata* y Figura 5.11 para *Pinus pinaster*).

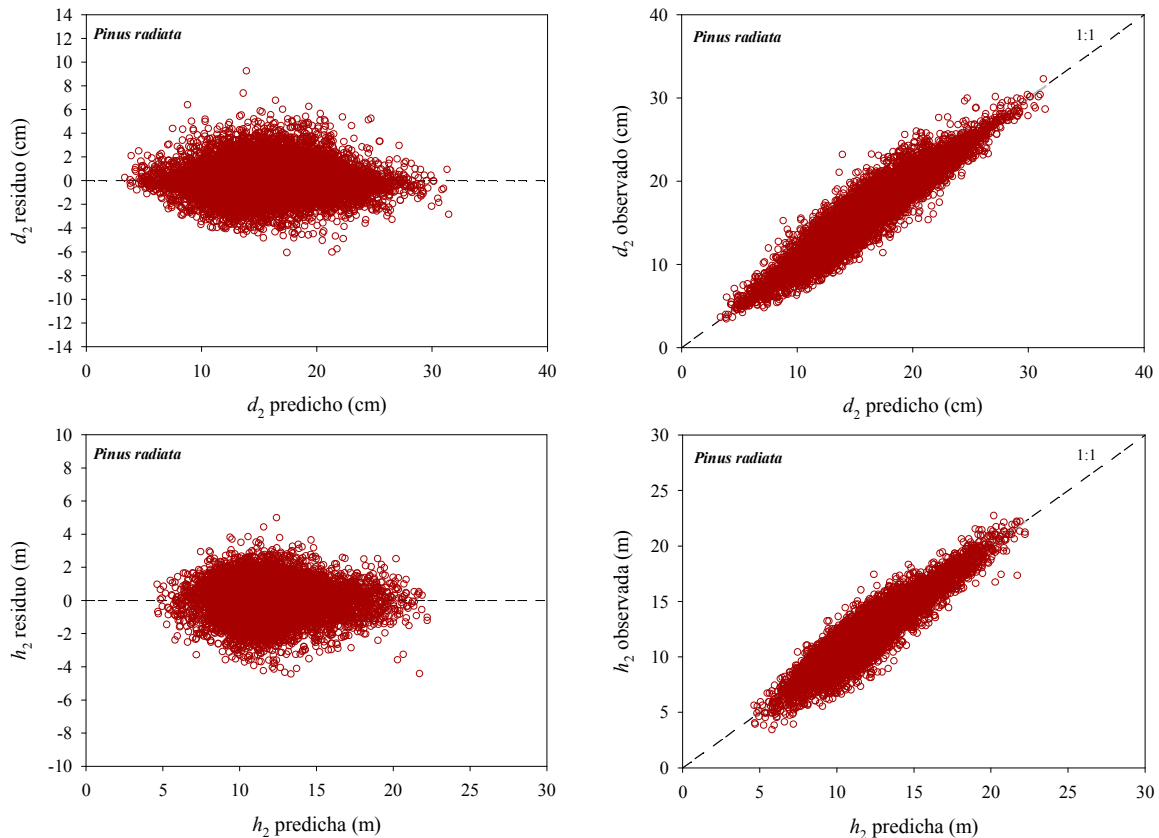


Figura 5.10. Valores de residuos frente a predichos (izquierda) y observados frente a predichos (derecha) para el modelo de crecimiento en diámetro (arriba) y altura (abajo) de *Pinus radiata*.

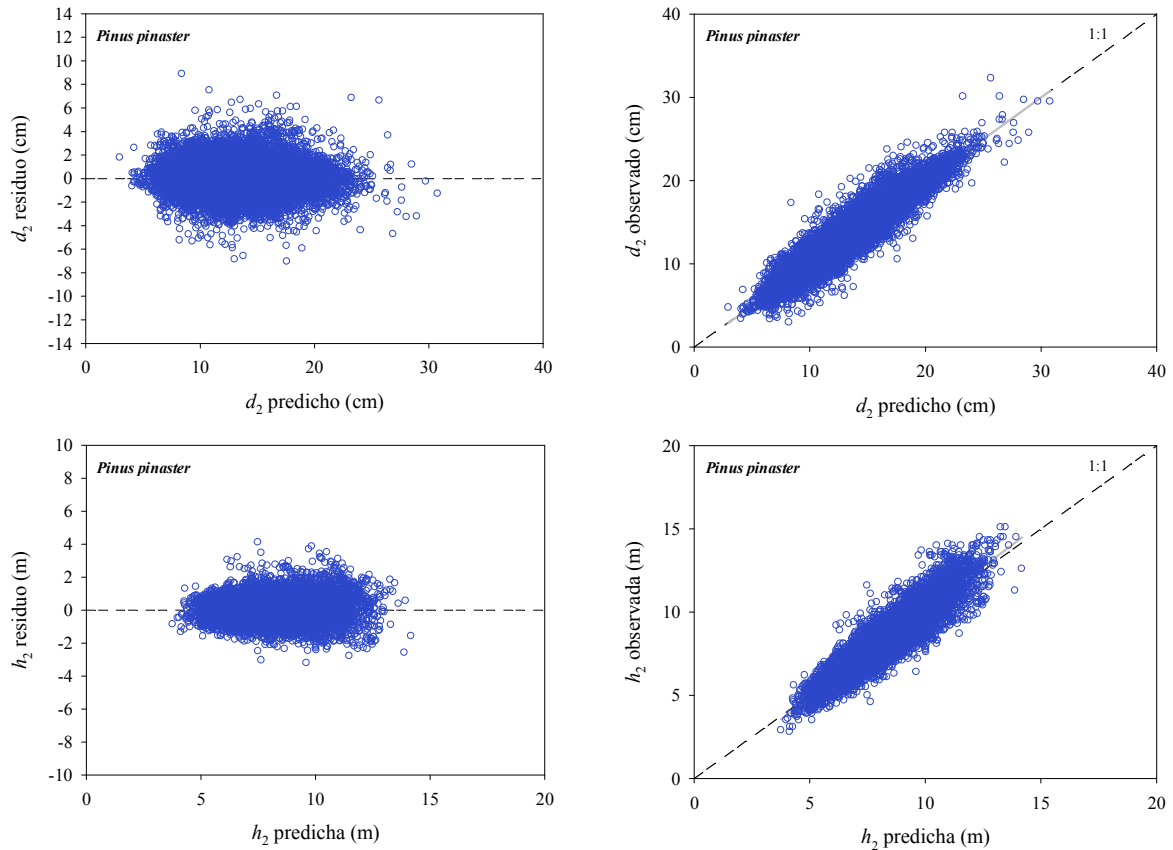


Figura 5.11. Valores de residuos frente a valores predichos (izquierda) y observados frente a predichos (derecha) para el modelo de crecimiento en diámetro (arriba) y altura (abajo) de *Pinus pinaster*.

Tal y como se observa en las figuras anteriores, los modelos seleccionados para ambas coníferas mostraron una distribución aceptable de los valores observados frente a los valores predichos, y de los residuos frente a los predichos, tanto para diámetro como para altura. Por tanto, los modelos seleccionados fueron considerados como modelos explicativos válidos para este trabajo.

A la vista de los resultados, el segundo sumando de los modelos de crecimiento ha incluido variables relacionadas con el propio tamaño del árbol (diámetro normal para los modelos de incremento en diámetro y altura), la severidad de poda aplicada en cada individuo (altura de copa relativa, hcr), las características en el momento inicial relacionadas con el estado de la masa (área basimétrica, G_1), la competencia entre los pies del rodal (relación Rd_{g1}) y la edad del árbol (t_1). En este tipo de modelos, tal y como indicó Crecente-Campo (2008), se debe procurar asegurar que el signo de los parámetros tenga un sentido biológico. Por ello, se presenta a continuación una somera evaluación del signo obtenido para los parámetros resultantes del ajuste de los modelos, siendo esperable encontrar ciertas diferencias en el comportamiento de cada especie. Hay que tener en cuenta que, como ya se ha comentado varias veces, el único objetivo de estos modelos es tratar de analizar con más detalle el efecto de cada variable y, sobre todo de la poda, sobre el crecimiento

en altura y diámetro. Por ello, se han mantenido todas las variables consideradas fundamentales (tamaño de partida d_1 o h_1 , edad de partida t_1 y periodo de crecimiento Δt) aunque los parámetros asociados no fueran significativos. Además, la mayor parte de la variabilidad explicada por el modelo se debe al primer sumando de la ecuación, teniendo un peso menor el resto de factores.

En primer lugar, el incremento en diámetro mostró una relación negativa con el tamaño en grosor del árbol para *Pinus radiata* y positiva para *Pinus pinaster*. Para el incremento en altura, sin embargo, el comportamiento fue totalmente contrario, con una relación positiva para *Pinus radiata* y negativa para *Pinus pinaster*. Estas diferencias en el crecimiento podrían estar asociadas, de acuerdo con lo comentado en el apartado anterior, con el reparto de los carbohidratos en el crecimiento diamétrico y de altura del árbol podado. De esta manera, en el caso de *Pinus radiata* la mayor inversión de los recursos sería para el crecimiento en altura, mientras que para *Pinus pinaster* la mayor inversión se produciría en el crecimiento diamétrico de los árboles a expensas del incremento en altura. Asimismo, el diferente comportamiento de ambas coníferas podría estar relacionado con el estado de desarrollo de las masas, de manera que el mayor desarrollo de los rodales de *Pinus radiata* podría estar limitando el crecimiento en grosor de los árboles de esta especie, que invertirían su mayor crecimiento en altura. En ese caso, se haría patente nuevamente la necesidad de reducir la densidad de la masa en los rodales de *Pinus radiata* estudiados, con el fin de facilitar el crecimiento en grosor de los pies pertenecientes a dichos ensayos. La consideración del tamaño actual del árbol, a través del diámetro normal, ha sido común con otros estudios previos (p.e. Wykoff, 1990; Lessard *et al.*, 2001; Calama, 2004; Crecente-Campo, 2008), siendo una variable fundamentalmente utilizada para modelos de incremento en diámetro. En dichos trabajos, han sido observadas igualmente relaciones contrarias entre el incremento en diámetro y el diámetro del árbol podado. Así, por ejemplo, Crecente-Campo (2008) encontró una relación positiva para *Pinus radiata*, mientras que la relación reportada por Calama (2004) para *Pinus pinea* fue negativa. Independientemente del tipo de relación, autores como Perry (1985) han indicado que la consideración del tamaño actual del árbol en este tipo de modelos resulta adecuada por tratarse de un buen indicador del crecimiento futuro del árbol, así como por el hecho de incluir el efecto de la competencia experimentada por el árbol en el pasado, y por contener además un componente genotípico de la respuesta del mismo frente a la variabilidad medioambiental.

La edad mostró también diferencias para ambas coníferas, con un mayor incremento en diámetro y altura a mayor edad en el caso de *Pinus radiata* y un crecimiento menor de ambas variables a mayor edad para *Pinus pinaster*. Esta variable ha sido considerada en la bibliografía como un factor importante para describir el crecimiento de los árboles, especialmente cuando se trata de masas

regulares (Pukkala, 1989; MacFarlane *et al.*, 2002; Zhao *et al.*, 2006; Crecente-Campo, 2008), siendo la reducción del potencial de crecimiento con la edad uno de los resultados más comúnmente obtenidos (p.e. Palahí y Grau, 2003; Nutto y Touza, 2004; Crecente-Campo, 2008). En este trabajo, sin embargo, apenas se contaba con un valor de edad de cada rodal, no teniendo valores para cada subparcela de poda como ocurría con el resto de variables consideradas en el modelo. Además de esto, todas las parcelas evaluadas presentaban edades bastante cercanas, siendo por otra parte parcelas con un comportamiento diferente en el crecimiento, asociado seguramente a las diferentes condiciones de crecimiento y características genéticas de cada sitio de ensayo. Así, por ejemplo, la parcela de mayor edad en *Pinus pinaster* presentaba una mayor competencia y previsible menor crecimiento, siendo, en cambio, la parcela de mayor edad de *Pinus radiata* la que tenía menor competencia que el resto de parcelas de menor edad. Asimismo, en el modelo de crecimiento en altura de *Pinus pinaster* incluso el parámetro obtenido para esta variable resultó ser no significativo para esta especie, lo que indicaría que la variación en altura ya estaría explicada por los otros factores del modelo. Por todo ello, la consideración de un mayor rango de edades y sitios de ensayo podría ayudar a obtener modelos de mayor exactitud.

Los cambios en los signos de los parámetros entre el tamaño en grosor y la edad van asociados, lo que también puede ser debido a la correlación positiva existente entre ambas variables que influye en la correlación entre los parámetros que las afectan.

Por otra parte, la severidad real de poda aplicada en cada árbol (*hcr*) mostró una relación negativa significativa con el incremento en grosor de los pies podados. Esta variable descriptiva de la poda no fue considerada en el modelo de incremento en altura, por no resultar significativa su relación. Este mismo resultado fue observado por Hynynen (1995), quien consideró la variable ratio de copa (R_{copa}) en su modelo de crecimiento en diámetro, pero no para el incremento en altura, en donde el ratio de copa no fue un regresor significativo. En muchos casos, tal y como ya se comentó en la parte introductoria de este capítulo, los modelos forestales de crecimiento desarrollados hasta el momento no han considerado variables asociadas a la poda en su formulación. Sin embargo, dada la influencia de la poda sobre el crecimiento del árbol, parece necesario incluir alguna variable explicativa del modelo que permita cuantificar la intensidad del tratamiento y su efecto sobre el crecimiento, especialmente para masas de especies productivas que requieran la aplicación de podas dentro de sus esquemas de gestión selvícola, como son las dos coníferas aquí evaluadas.

Por otro lado, independientemente de que la gestión selvícola de la masa incluya la realización de podas, diversos autores han destacado el papel que juega la copa en

el crecimiento del árbol, especialmente su parte viva, y la importancia que presenta por lo tanto la consideración de la proporción de la copa del árbol en los modelos de crecimiento. Así, por ejemplo, el ratio de copa viva ha sido relacionado con aspectos como el vigor del árbol, la competencia existente sobre el mismo, su potencial fotosintético o su incremento en volumen (p.e. Hynynen, 1995; Raulier *et al.*, 1996; Huang *et al.*, 2003; Zhao *et al.*, 2004). Asimismo, Vanclay (1994) apunta que el conocimiento de las características de la copa resulta útil, a su vez, para cuantificar la recuperación de los árboles a las intervenciones selvícolas aplicadas, especialmente las claras. Además, de acuerdo con Huang *et al.* (2003) los modelos de crecimiento que incluyen la proporción de copa van a ser biológicamente razonables por su relación con los aspectos anteriormente mencionados, especialmente la capacidad fotosintética del árbol. Por tanto, la inclusión de variables de copa sensibles a las intervenciones selvícolas, como pueden ser las podas y las claras, es un aspecto importante para el desarrollo de modelos forestales de crecimiento, al aportarles una gran flexibilidad para la predicción de diferentes operaciones selvícolas, lo que resultará de gran interés para el gestor forestal. En este caso, resulta necesario destacar que la consideración de este tipo de variables en un modelo forestal de crecimiento implica incluir también dichas variables en el inventario forestal.

Como ejemplos de modelos de crecimiento que han incluido variables de copa en su formulación están los modelos de masa de Costas *et al.* (2006; 2007) Fassola *et al.* (2008b), y los modelos de árbol individual de Cañadas (2000) o de Burkhart *et al.* (2001; 2003). En todos ellos fue empleada como variable explicativa el ratio de copa, llegando a observar incluso, en algunos casos, la explicación de un gran porcentaje de la varianza del modelo para dicha variable de copa. Tal es el caso del trabajo de Monserud y Sterba (1996), en donde el ratio de copa junto con el diámetro normal lograban explicar el mayor porcentaje de varianza del modelo (20-63%). Hynynen (1995) encontró, para su modelo de crecimiento en diámetro, una mayor precisión al incluir el ratio de copa como variable regresora del modelo. Asimismo, Costas *et al.* (2006; 2007) indicaron que la inclusión del ratio de copa como variable descriptora de la poda daba lugar a modelos dinámicos de crecimiento más flexibles y eficientes (Costas *et al.*, 2006). La razón de copa ha sido incluida también en diversos simuladores forestales (p.e. FOREST (Ek y Monserud, 1974); WASIM (Sterba, 1990); MOSES (Hasenauer *et al.*, 1995); y SILVA (Pretzsch, 1992); cit. por Gadow *et al.*, 2001) en los que ha sido utilizada como variable descriptora de la competencia del árbol en el pasado (Gadow *et al.*, 2001). En todos estos modelos, la variable de ratio de copa mostró una relación positiva con el incremento de la variable predicha, lo que indicaría que árboles con mayor proporción de copa respecto a su altura total crecerían más que árboles con menor copa para la misma altura. Estos resultados serían coincidentes con los observados

en el presente trabajo para los modelos de incremento en diámetro de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster*. De acuerdo con todo lo anterior, y teniendo en cuenta la influencia de la poda sobre el crecimiento de diversas especies forestales, parece clara la importancia de incluir esta intervención selvícola en los modelos forestales de crecimiento, corroborado por autores como García (1993) o Costas *et al.* (2006; 2007).

Las variables de masa y de competencia empleadas en los modelos presentados en este trabajo (G y Rd_g) mostraron un mismo signo de los parámetros en los modelos de crecimiento en diámetro de ambas especies, con un menor crecimiento en diámetro a mayor área basimétrica y menor índice de competencia Rd_g . Este resultado indicaría que para rodales más densos y con una mayor competencia por el espacio, el diámetro crecería más despacio y, en esa situación, los árboles más dominantes crecerían más que los árboles de menor tamaño. El crecimiento en altura, sin embargo, mostró una relación diferente con el área basimétrica para cada especie. Así, el incremento en altura fue menor para los lugares de mayor área basimétrica en *Pinus radiata* y mayor para los rodales con mayor área basimétrica en *Pinus pinaster*, siendo este último resultado más coherente con la realidad. En todo caso, el efecto de esta variable sobre la capacidad explicativa del modelo es muy reducido. En cuanto al índice de competencia, en ambas especies se observó un mayor incremento en altura para los árboles dominantes ($Rd_g > 0$). Este resultado coincidiría con lo apuntado por Pukkala (1989) y Miina (1993), quienes indicaron que los árboles del estrato dominante experimentan mayores crecimientos que los pies del resto de los estratos de la masa. Por todo lo anterior, y dado el mayor crecimiento en diámetro y altura para los árboles del estrato superior, cabría esperar un mayor volumen de los mismos en los años sucesivos a la poda, en comparación con los árboles pertenecientes a clases sociológicas inferiores.

La variable de masa G ha sido considerada también en los modelos de crecimiento de diámetro y/o altura de Trasobares *et al.* (2004b), Palahí y Grau (2003), Crecente-Campo (2008), o Zhao *et al.* (2004). Su inclusión en modelos de crecimiento ha sido interpretada en muchos casos como indicador de la competencia, de manera que mayores valores de la variable G estarían asociados con menores incrementos en diámetro. En este trabajo se han evaluado también otras variables de masa utilizadas habitualmente como variables explicativas del crecimiento, entre las que cabe destacar el número de pies por hectárea (Calama, 2004; Adame *et al.*, 2010), el índice de calidad de estación (Cañadas, 2000; Palahí y Grau, 2003; Soares y Tomé, 2003; Calama, 2004; Trasobares *et al.*, 2004b; Adame *et al.*, 2010) y la altura dominante (Hynynen, 1995; Mabvurira y Miina, 2002; Calama, 2004; Adame *et al.*, 2010), aunque los mejores resultados se obtuvieron para la variable G .

El índice de competencia independiente de la distancia, Rd_g también ha sido incluido en el modelo de crecimiento en diámetro de Calama (2004). Nuestros resultados coinciden con los obtenidos en dicho trabajo, donde este índice que caracteriza la posición social del árbol dentro de la masa, presenta una relación positiva con el incremento en diámetro. Otro de los índices independiente de la distancia frecuentemente empleado en modelos de crecimiento es el índice *BAL* (p.e. Wykoff, 1990; Lessard *et al.*, 2001; Sterba *et al.*, 2002; Cañadas, 2000; Trasobares *et al.*, 2004 a;b; Crecente-Campo, 2008; Adame *et al.*, 2010; Lhotka y Loewenstein, 2011), aunque en este caso no ha mostrado mejores resultados que el ratio Rd_g .

Además de las variables comentadas, existen diversos factores que resultan igualmente determinantes en el proceso de crecimiento de un árbol, y cuya cuantificación y consideración en un modelo de árbol individual puede resultar bastante costoso (p.e. las características genéticas del material estudiado). Estos aspectos que no han sido incluidos en los modelos aquí presentados, van a formar parte de la variabilidad no explicada por el modelo (Henttonen, 1990; Hökkä y Groot, 1999; y Calama, 2004). Por otro lado, Calama (2004) y otros autores como Pukkala (1989) o Palahí y Grau (2003) señalan que la variabilidad residual intra-árbol puede estar relacionada también con errores humanos durante la medición de las variables. En línea con esto, Monserud y Sterba (1996) destacan que el procedimiento de medición y cálculo de las variables dependientes afectan al límite superior de la variación explicada. Además se ha de tener en cuenta que la variabilidad puede estar asociada al tamaño del árbol, diferencias entre parcelas o diferencias entre árboles de una misma parcela (Henttonen 1990; Hökkä y Groot 1999; Mabvurira y Miina, 2002, Palahí y Grau 2003; Calama 2004).

En el futuro, para poder explicar mejor el peso de los distintos componentes que forman parte del modelo, sería necesario efectuar una evaluación posterior del crecimiento, con un mayor detalle, y en la que deberían ser consideradas, además, otras variables que regulan dicho proceso como son las características del sitio, destacando las propiedades del suelo (Nunes *et al.*, 2011) y las condiciones fisiográficas (Trasobares *et al.*, 2004 a;b), la variación medioambiental (Zeide, 1993; Battaglia y Sands, 1998; Nunes *et al.*, 2011), y las características genéticas (Nutto y Touza, 2004). Así, será necesario desarrollar modelos de crecimiento en diámetro y altura que sean sensibles a las condiciones edafo-climáticas y a los tratamientos selvícolas para poder simular diferentes estrategias de adaptación, planteamiento que ha adquirido mayor relevancia en los últimos años, como consecuencia del cambio climático y las condiciones de crecimiento cambiantes.

Asimismo, Hynynen (1995) señala que de forma ideal los datos necesarios para desarrollar modelos para la planificación de la gestión forestal deberían ser representativos de la muestra de masas de la región en la que serán aplicados los

modelos. Además, los datos deberían cubrir la amplia variedad de tratamientos selviculturales, y también observaciones repetidas durante un largo periodo de tiempo. Aun así, otros autores como Burkhart (1993) han apuntado que no hay una base de datos óptima para todos los propósitos. Crecente-Campo *et al.* (2010) resaltan que habitualmente los modelos de crecimiento de árbol individual resultan adecuados para proyecciones a corto plazo, pero no a largo plazo, principalmente si la escala temporal utilizada es anual, dado el menor error que se genera al principio de las proyecciones y el posible mayor error en simulaciones para un periodo mayor. Unido a todo lo anterior, y de acuerdo con Burkhart (1987), no se debe olvidar tampoco que todo modelo debe ser compatible con el resto de modelos definidos para el mismo ámbito y especie.

Por tanto, y dado que el estudio realizado en esta parte de la tesis ha considerado árboles con 7-16 años, situados en tan solo cuatro sitios de ensayo para cada especie, en los que se ha llevado a cabo una primera intervención de poda, y en los que tan solo han podido ser realizados tres inventarios forestales, será necesario ampliar la base de datos empleada en este primer estudio, para la definición de modelos predictivos del crecimiento individual en diámetro y altura de ambas especies en Asturias. Esto será de mayor interés a partir de la segunda fase experimental en la que se podrán incluir además los efectos de diferentes intervenciones de podas y claras, debiendo buscar un compromiso entre consideraciones biológicas y estadísticas. De esta manera, se podrán establecer modelos de predicción de gran utilidad para la maximización del valor de las masas productivas de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* en el noroeste peninsular, al considerar en su formulación el efecto de las podas y las claras sobre el crecimiento del árbol. En cualquier caso, y a pesar de la necesidad de realizar un estudio posterior más detallado, la falta de trabajos que consideren actualmente el efecto de la poda sobre el crecimiento individual del árbol en las principales especies productivas del ámbito atlántico, hace que este primer estudio adquiera mayor importancia.

5.3.3. Influencia de la poda sobre el estatus social y la producción unitaria del árbol

Para estudiar la influencia de la intensidad de la poda sobre el mantenimiento o cambio de estatus social de los árboles de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster*, se realizó, para cada especie e inventario, el reparto de los pies pertenecientes a cada tratamiento real de poda (severidades agrupadas en 15%, 30% y 45%) en ocho clases sociológicas, agrupadas a su vez en árboles dominantes, codominantes, intermedios y dominados o sumergidos, de acuerdo con lo explicado en el capítulo 2 (apartado 2.5.4).

En la Tabla 5.6 se presenta, para cada especie e inventario, el cambio producido tras la poda en el reparto de árboles de las dos clases sociológicas más extremas (árboles dominantes (clase 1) y dominados o sumergidos (clase 8)). Tal y como se puede observar en esta tabla y en la Figura 5.12, la primera intervención de poda realizada en ambas coníferas mostró tener cierta influencia sobre la estructura de la masa, siendo *Pinus radiata* la especie que presentó mayores fluctuaciones en la posición social de los árboles tras la poda.

Tabla 5.6. Evolución (%) en el reparto de árboles dominantes (clase sociológica 1) y dominados o sumergidos (clase sociológica 8), para cada especie e inventario, en función de la severidad de poda (agrupada en 15%, 30% y 45%), en todo el período de estudio (inviernos 2005-2006 a 2010-2011).

Especie	Inv	% Evolución clases sociológicas					
		Dominantes			Dominados o sumergidos		
		Severidad poda (%)			Severidad poda (%)		
		15	30	45	15	30	45
<i>Pinus radiata</i>	2	2,99	9,94	-10,98	-4,94	-4,27	8,10
	3	5,97	9,36	-11,56	-12,17	-3,73	9,57
<i>Pinus pinaster</i>	2	31,58	0,82	-2,09	-12,90	-3,88	0,78
	3	47,37	6,56	-6,69	-16,94	-8,42	0,89

donde *Inv* es el código de inventario (2-invierno 2008-2009; 3- invierno 2009-2010 después de clara y poda alta en *P. radiata* e invierno 2010-2011 después de clara en *P. pinaster*); y *Severidad poda* es la intensidad real de poda, en %.

La Figura 5.12 representa el reparto de árboles de la masa para cada clase sociológica, diferenciando la severidad del tratamiento de poda y el inventario realizado para cada una de las especies estudiadas (*Pinus radiata* y *Pinus pinaster*).

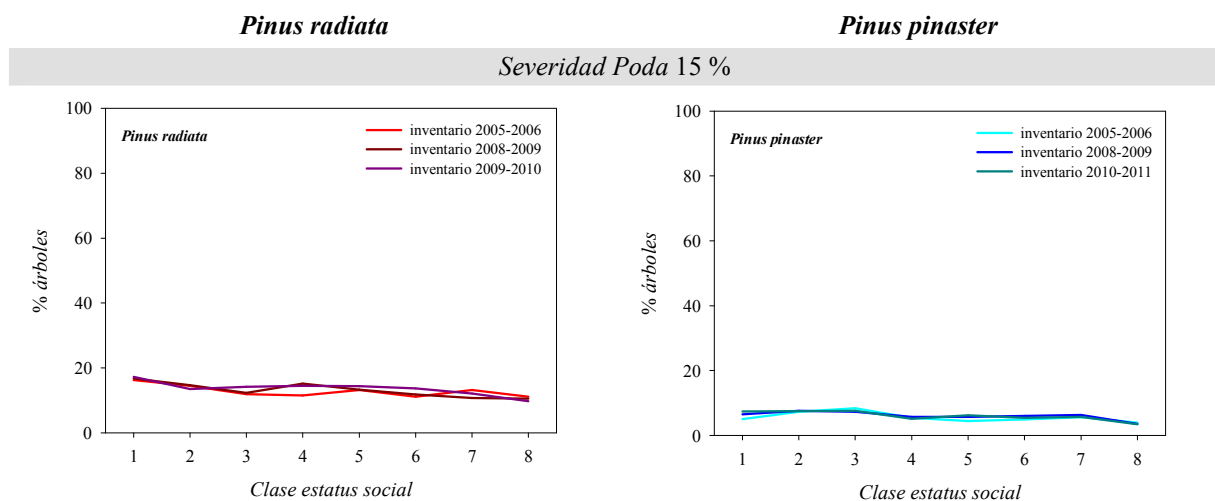


Figura 5.12. Evolución del porcentaje de árboles de cada clase sociológica, para cada especie e intensidad de poda (severidad de poda del 15%, 30% y 45%), diferenciando cada inventario (el conjunto de severidades de poda de cada especie conforman el 100% de los árboles de cada clase de estatus social e inventario).

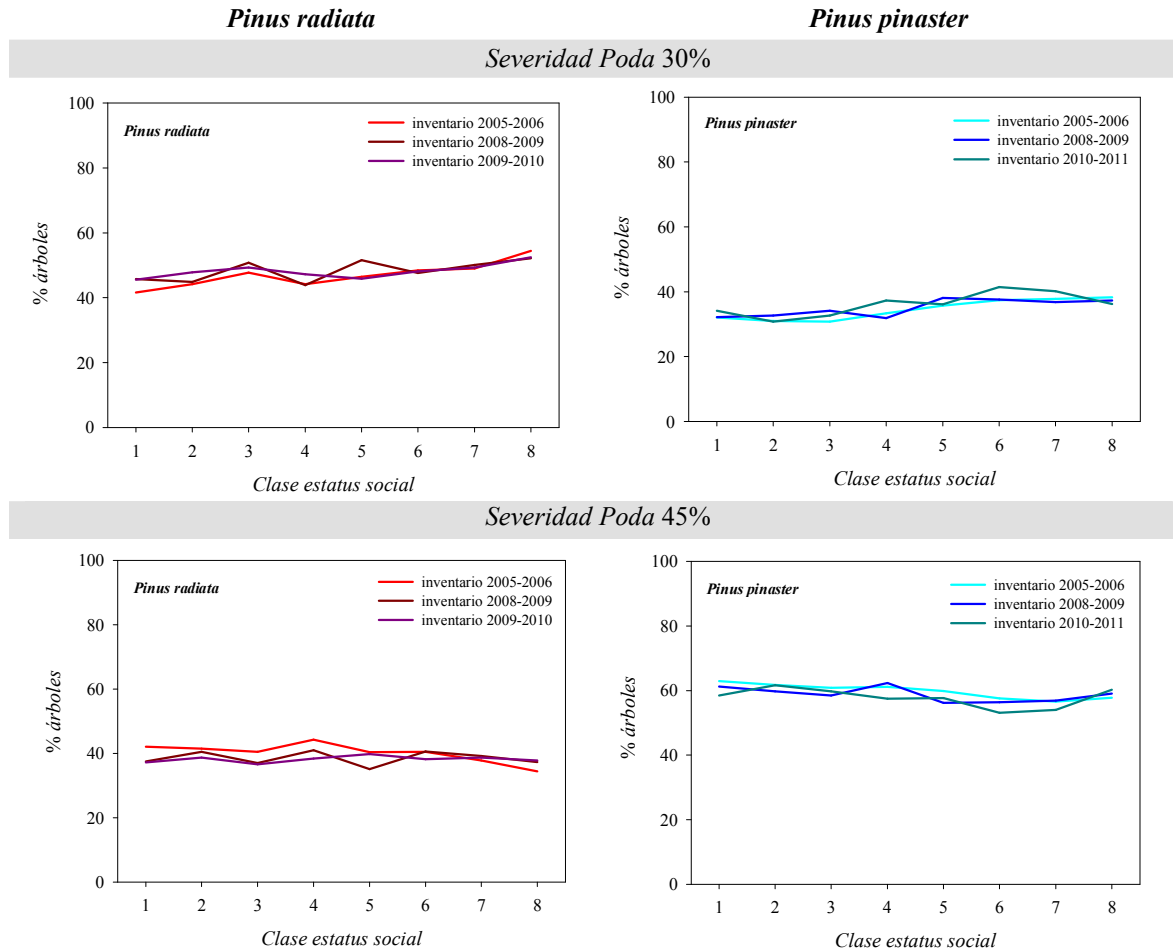


Figura 5.12 (continuación). Evolución del porcentaje de árboles de a cada clase sociológica, para cada especie e intensidad de poda (severidad de poda del 15%, 30% y 45%), diferenciando cada inventario (el conjunto de severidades de poda para cada especie conforman el 100% de los árboles de cada clase de estatus social e inventario).

De acuerdo con la Figura 5.12, por lo general, los pies podados con severidades del 15% y 30% mostraron una mayor tendencia a evolucionar hacia las clases dominante y codominante (clases 1 y 2 respectivamente), con una reducción del porcentaje de árboles pertenecientes a la clase sociológica inferior (clase 8). Por contra, los árboles podados con una severidad de poda del 45% mostraron una tendencia a perder su estatus social, sobre todo en las clases dominante (clase 1) y codominante (clase 2), e incluso algunas clases intermedias, con un aumento de árboles de las clases sociológicas inferiores. En este sentido, debe ser considerado que el criterio empleado para establecer las clases sociológicas en este estudio se basó en el tamaño diamétrico de los pies, de manera que los árboles con mayor pérdida de incremento en diámetro, coincidentes con los pies podados con mayor severidad, serían más susceptibles a perder su dominancia que aquellos árboles en los que el crecimiento en diámetro se viera menos afectado por la poda.

Al igual que en este trabajo, Courdier *et al.* (2002) observaron para *Pinus pinaster* un cambio en el estatus social de los árboles tras la poda, con una reducción

importante de pies del estrato dominante (42%) para la poda de mayor intensidad (2 verticilos remanentes o 61% de copa verde eliminada) tras siete años de estudio. En ese mismo trabajo, el tratamiento de poda más débil (4 verticilos remanentes o 33% de copa verde eliminada) y el tratamiento control, en cambio, habían mantenido la totalidad de los árboles entre los 200 pies más gruesos por hectárea (clases 1 y 2, correspondientes con los árboles dominantes y codominantes).

Cabe destacar el aumento en el número de árboles dominantes en el tratamiento de poda más débil (15%) en *Pinus pinaster*. Esto podría ser debido a la presencia de una mayor cantidad de ramas muertas antes de la poda en esta especie, favoreciendo el crecimiento de los mismos tras su eliminación. Los cambios ocurridos en los otros dos tratamientos de poda en esta misma conífera fueron menos marcados. Para *Pinus radiata*, el mayor impacto se produjo en los árboles podados con mayor severidad (45%), con una reducción del 11-12% de los pies del estrato dominante.

Tal y como señalaron Sutton y Crowe (1975), Courdier *et al.* (2002) o Rodríguez (2005), los cambios producidos en la posición sociológica de los árboles podados guardan relación con la influencia mostrada por el tratamiento de poda sobre el crecimiento. Así, de acuerdo con esto, el menor incremento diamétrico observado para el tratamiento de poda de mayor severidad (45%) estaría asociado con la mayor pérdida de dominancia producida en los pies sometidos a dicha intervención.

Además de la intensidad de poda, autores como Pinkard y Beadle (1998b) o Rodríguez (2005) observaron que el estatus social de los árboles podados se veía afectado a su vez por factores como la especie, la calidad del sitio o el material genético. Asimismo, la realización de claras junto con las podas ha mostrado ser un paso clave para mantener la dominancia de los árboles podados, al facilitar un mayor crecimiento en grosor de los pies intervenidos (p.e. Sutton y Crowe, 1975; Courdier *et al.*, 2002; Montagu *et al.*, 2003). Esta intervención será aun más importante cuando la poda sea realizada tan solo en una selección de los pies de la masa (Fassola *et al.*, 2002b), dado el mayor riesgo de pérdida de dominancia que conlleva este tipo de poda selectiva, en la que los árboles intervenidos pueden ver limitado su crecimiento con respecto a los árboles vecinos en los que no sea efectuada la poda.

Si bien es cierto que la realización de claras supone un aspecto clave para evitar la pérdida de estatus social de los pies podados y preservar así la población de porvenir de la masa intervenida, de acuerdo con Nutto y Touza (2004), tan solo se podrán obtener árboles con dimensiones y calidad adecuados para su aserrado en estaciones de buena calidad, dado el limitado potencial de crecimiento diametral de los árboles que se encuentran en estaciones de baja calidad, incluso ofreciéndoles espacio suficiente para crecer. En este sentido, de acuerdo con James *et al.* (1970), estas pautas serán aun más importantes para la poda alta por tratarse de una intervención

mucho más costosa, y en la que tan solo se van a podar los pies de porvenir (pies con buenas características para la obtención de madera de sierra).

En vista de lo anterior, resulta necesario considerar el posible cambio de estatus social de los árboles podados para la selección de los pies de porvenir. De esta manera, en una masa en la que sea realizada la poda de todos los árboles, resulta recomendable seleccionar los árboles de porvenir en un paso posterior a la intervención, considerando así el posible cambio de estatus social que puede ocurrir tras la intervención. Por otro lado, en una masa en la que se lleve a cabo una poda selectiva, tal y como recomiendan Montagu *et al.* (2003), debe seleccionarse una cantidad extra de árboles, además de los pies que previsiblemente llegarán al turno final (árboles de porvenir, con buenas características para obtener madera de calidad) (Montagu *et al.*, 2003) siendo imprescindible acompañar las podas con las claras para evitar que los pies no podados de la masa compitan y ralenticen el crecimiento de los árboles de porvenir seleccionados (Lückhoff, 1967; Sutton y Crowe, 1975; Bredenkamp *et al.*, 1980; Collier y Turnblom, 2001).

Por otra parte, dada la influencia de la poda en el crecimiento diamétrico de los árboles, era esperable que dicho tratamiento tuviera un efecto sobre la producción de los pies intervenidos. Por ello, y considerando tan solo aquellos individuos que no mostraron cambios en su posición sociológica durante todo el tiempo de estudio (invierno 2005-2006 a 2010-2011), fue estimado el volumen unitario en función de la severidad de poda y su estatus social, para cada inventario y especie (Figura 5.13).

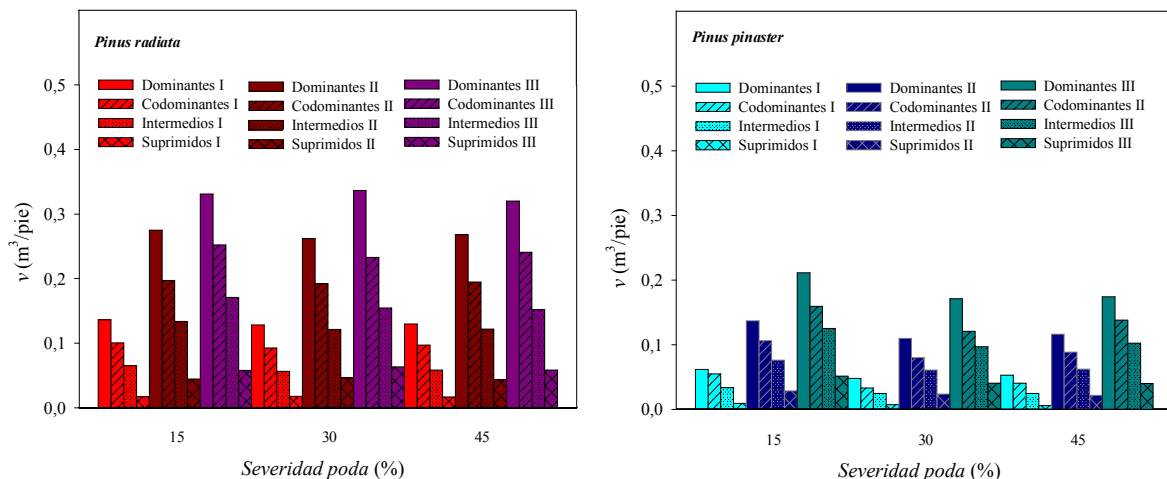


Figura 5.13. Volumen unitario medio en cada inventario realizado (I, II y III), para *Pinus radiata* (izquierda, tonalidades de color rojo) y *Pinus pinaster* (derecha, tonalidades de color azul), en función de la severidad de poda aplicada (agrupada en 15%, 30% y 45%) y la clase sociológica del árbol (agrupada en dominantes, codominantes, intermedios y suprimidos).

De acuerdo con la Figura 5.13, el volumen de los árboles podados, para ambas especies, tendió a ser inferior a mayor intensidad de poda y menor clase de dominancia. Diversos trabajos previos como los de Pinkard (2002) y Pinkard *et al.*

(2004) han observado también una reducción en el volumen del árbol tras de la poda, con mayores diferencias a mayor intensidad del tratamiento. Fassola *et al.* (1999 b;d) observaron, además, un menor incremento en volumen a mayor número de intervenciones realizadas. Este efecto de la poda sobre la producción del árbol resulta de gran importancia para el valor final de la masa. Por ello, y atendiendo al trabajo de Endo y Velez-Mesa (1992), se debe procurar realizar podas que no sean excesivas para que el efecto de la intervención sobre la producción de los pies no resulte negativo a medio-largo plazo.

Por tanto, tal y como se observa en la figura anterior, la clase sociológica del árbol va a resultar de gran importancia para la selección de los pies de porvenir, por su diferente respuesta en el crecimiento y producción ante una gestión selvícola de podas. Atendiendo a la bibliografía, se pueden encontrar diversos trabajos que asocian la idoneidad de los árboles a podar por su dominancia en la masa intervenida. Así, por ejemplo, la revisión realizada por Barrio *et al.* (2009) indica que los árboles que no son dominantes o codominantes en la masa tienen poca capacidad de reacción frente a la poda, con un bajo crecimiento diamétrico de los árboles y una peor cicatrización de las heridas, no recomendando su poda para la obtención de madera de calidad. Sutton y Crowe (1975) respaldan esta misma idea, considerando que los árboles dominantes deben ser los árboles sobre los que actuar en un esquema de poda selectiva. Smith *et al.* (1997), por su parte, destacan que la poda sobre árboles dominantes va a permitir además realizar tratamientos de poda más severos. O'Hara (1991) explica también que el efecto negativo de la poda será menor para los árboles dominantes con relación a los árboles suprimidos, por presentar copas mayores y con menor supresión lateral. Sin embargo, dentro de la silvicultura orientada a producir madera de sierra, autores como Nutto y Touza (2004) recomiendan la poda no solo de árboles dominantes sino también de un número adicional de pies de la masa que puedan crecer con una tasa comparable. Courdier *et al.* (2002) señalan además que los árboles seleccionados para la realización de una poda selectiva no necesariamente debe coincidir con los árboles dominantes de la masa, dado el riesgo que supone el posible cambio de estatus social tras la poda.

Además de la dominancia de los pies, se debe procurar que los árboles elegidos para la obtención de madera de calidad presenten también unas características apropiadas para maximizar el valor final del producto, siendo habitualmente destacadas la buena forma del fuste (rectitud, poca ramosidad) y el buen crecimiento (Montagu *et al.*, 2003; Nutto y Touza, 2004; Amateis y Burkhart, 2011). Asimismo, Amateis y Burkhart (2011) han indicado también la importancia del potencial genético en la determinación de los árboles a podar. Por todo ello, el proceso de selección de los mejores candidatos para la obtención de madera de calidad debe considerar, en la medida de lo posible, los aspectos comentados. Estas indicaciones

presentan especial relevancia en las masas de las principales especies productivas del ámbito atlántico, en donde la silvicultura aplicada actualmente considera la poda de todos los pies, para una misma altura de poda, sin diferenciar los árboles por sus características fenotípicas o de dominancia. Asimismo, dentro de la gestión selvícola efectuada en esta zona del territorio, la selección de árboles de porvenir suele realizarse durante el señalamiento de la clara, atendiendo fundamentalmente a la dominancia de los pies como criterio de selección, sin tener en cuenta otros factores determinantes en la calidad final del producto como los anteriormente comentados.

Por último, se debe señalar que además del volumen de madera producido, resulta tanto o más importante la cuantificación de la cantidad de madera que es de calidad, considerando principalmente la proporción del tronco que no presenta defectos y la forma y rectitud del fuste. Es por ello que, de acuerdo con Rodríguez (2005), y según lo señalado en el capítulo 4, resulta recomendable realizar un análisis combinado del crecimiento y perfil del árbol tras la poda. Por ello, y en este caso, el menor incremento diamétrico del árbol a mayor intensidad de poda podría verse compensado por la mejor conformación observada en el tratamiento de mayor severidad. Este mismo resultado fue obtenido por Rodríguez (2005) para clones de chopo, quien apuntó que la mayor forma cilíndrica del tronco en la poda más intensa daría lugar a una madera de mayor calidad.

Por tanto, tal y como se ha recogido en este capítulo, el crecimiento y producción del árbol así como la estructura de la masa forestal han mostrado responder de forma diferencial a la gestión de podas aplicada.

5.4. Conclusiones

En este trabajo se ha realizado una primera evaluación del crecimiento individual de árboles de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* pertenecientes a masas productivas en las que ha sido efectuada una primera intervención de poda bajo diferentes intensidades del tratamiento.

La poda efectuada mostró una reducción significativa del incremento diamétrico de los árboles, con un mayor efecto para *Pinus radiata*, siendo mayor la reducción del crecimiento a mayor intensidad del tratamiento. El crecimiento en altura no se vio afectado por la poda de forma significativa en *Pinus pinaster*. Para *Pinus radiata* se observaron diferencias significativas entre las severidades de poda del 30% y 45%. Comparativamente, los incrementos en altura en *Pinus radiata* fueron superiores a los de *Pinus pinaster*. Este comportamiento observado en ambas especies fue ligeramente diferente entre los sitios evaluados, siendo también significativas las diferencias en el crecimiento del árbol en función del sitio de ensayo y la interacción sitio-tratamiento de poda.

La intensidad de poda, expresada en función del número de verticilos remanentes tras la intervención, provocó la mayor reducción del crecimiento corriente en diámetro cuando se dejaban cuatro o menos verticilos en la copa, mientras que la intensidad de poda definida en función de la longitud de copa remanente provocó las mayores reducciones para copas con longitudes inferiores o iguales a cuatro metros.

Los modelos de crecimiento individual en diámetro y altura, definidos para ambas especies, han considerado como factores influyentes en el proceso de crecimiento variables asociadas con el tamaño y edad del árbol, la severidad de poda, el estado de desarrollo de la masa y la competencia. Estos modelos mostraron un comportamiento ligeramente diferente para las especies evaluadas. En *Pinus radiata* hubo una mayor inversión de recursos para el crecimiento en altura, mientras que en *Pinus pinaster* el mayor reparto de los recursos fue para el crecimiento en diámetro. En los modelos de ambas especies, los mayores valores de competencia por el espacio mostraron menores incrementos en grosor, siendo menos afectados ante esta situación los árboles que se encontraban en el estrato dominante. En términos generales, los modelos ajustados explicaron una variabilidad alta de los datos (85-90% para *Pinus radiata* y 84-88% para *Pinus pinaster*), con una mayor precisión para las estimaciones del crecimiento en diámetro que en altura en ambas especies. Un paso posterior de este trabajo debe incluir la validación de los modelos de crecimiento individual para poder desarrollar modelos predictivos que aporten herramientas prácticas para la gestión forestal de las masas productivas de estas especies en el ámbito atlántico.

La poda ha mostrado cierta influencia sobre el estatus social de los árboles, con mayor efecto en *Pinus radiata*. La severidad de poda del 45% provocó la mayor pérdida de árboles del estrato dominante, mientras que las otras dos intervenciones de poda (15% y 30%) favorecieron la incorporación de árboles a los estratos superiores, especialmente *Pinus pinaster* en la severidad de poda del 15%. Dada la posible fluctuación en la posición sociológica de los árboles tras la primera intervención de poda parece recomendable realizar la selección de los pies de porvenir en un paso posterior de la gestión selvícola de la masa.

La estimación del volumen unitario de los pies que no vieron modificado su estatus social durante todo el período de estudio mostró una mayor producción en los árboles de las clases dominante y codominante que en el resto de clases sociológicas, con el menor volumen para los árboles dominados o sumergidos. Por ello, los árboles de los estratos superiores que cumplan con otros criterios de ramosidad y rectitud del fuste, serán los mejores candidatos como árboles de porvenir sobre los que realizar la poda.

Finalmente, se debe considerar que los estudios aquí presentados fueron establecidos en un área importante pero limitada de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster*

en Asturias. Por ello, debe tenerse la precaución de no extender los resultados a otros ámbitos o condiciones de la masa. Asimismo, un correcto análisis del crecimiento de los árboles tras la poda debe considerar también el efecto de otros tratamientos y situaciones de la masa. Resulta por tanto necesario ampliar el tamaño de la muestra tratando de analizar también la posible influencia de un mayor rango de factores reguladores del crecimiento que no han podido ser considerados en el presente estudio. Por tanto, se espera que la segunda fase experimental de los ensayos evaluados en este trabajo, en la que está prevista la realización de la poda alta y la primera intervención de clara, sea una buena oportunidad para la mejora de los resultados aquí presentados, aportando una mayor información sobre la influencia de ambas intervenciones en el crecimiento, estatus social y producción de los árboles de ambas especies a medio-largo plazo. Hasta entonces, y dada la falta de estudios de poda en masas de las principales coníferas del ámbito atlántico, el trabajo aquí presentado constituye un paso previo importante para definir las pautas más adecuadas para la poda de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* en Asturias.



CAPÍTULO 6

**Estimación de la biomasa arbórea aérea y
su distribución vertical en masas jóvenes
regulares de *Pinus pinaster* Aiton**

ESTIMACIÓN DE LA BIOMASA ARBÓREA AÉREA Y SU DISTRIBUCIÓN VERTICAL EN MASAS JÓVENES REGULARES DE *Pinus pinaster* Aiton

6.1. Introducción

La **biomasa forestal** se puede definir, desde una perspectiva amplia, como la materia orgánica existente en un determinado ecosistema forestal, expresada generalmente por unidad de superficie o volumen (Pardé, 1980). Se suelen considerar dos grandes tipos de biomasa: (1) subterránea, referida a las raíces, y al suelo en un sentido más amplio; y (2) aérea, que incluye tallos o troncos, ramas y hojas. Su relación con factores como el balance nutricional del ecosistema forestal, los procesos ecofisiológicos que regulan el crecimiento y la productividad de la masa, el contenido de CO₂, el riesgo de incendio forestal, el riesgo sanitario (especialmente de propagación de una plaga) así como su posible aprovechamiento energético para la obtención de calor o electricidad, ha generado un interés creciente por el conocimiento y cuantificación de la biomasa existente en un sistema forestal.

La **gestión selvícola** de una masa implica indirectamente la gestión de la biomasa forestal existente en su parte aérea, lo que a su vez supone una modificación de los diferentes factores asociados a dicha biomasa. En el caso concreto de las masas de coníferas gestionadas para obtener madera de calidad, las podas y las claras son los tratamientos selvícolas en los que recae el mayor interés. Por ello, en este tipo de masas, la influencia de ambas intervenciones sobre la biomasa forestal, y el resto de factores asociados, pasa a ser uno de los puntos más importantes para su correcta gestión. Una vez realizadas ambas operaciones (podas y claras), la gestión de los restos generados (biomasa residual) presenta un papel primordial en la influencia de los tratamientos sobre el sistema forestal intervenido. En general, para las masas de coníferas del noroeste peninsular, se puede hablar de diferentes tratamientos de los restos selvícolas en función de su tamaño: la biomasa fina (ramas finas, ramillas y acículas), generada en las podas y las claras, se mantiene habitualmente en el monte; por contra, la biomasa más gruesa (asociada al fuste del árbol), obtenida en las claras, puede ser extraída para su aprovechamiento industrial, o ser igualmente abandonada en el monte. En este sentido, resulta frecuente que la biomasa del fuste obtenida en las claras, conformada habitualmente por pies de calidades bajas y medias, sea destinada a un uso industrial. Sin embargo, hasta hace poco, y especialmente en las primeras claras, la baja calidad de los pies obtenidos y la baja rentabilidad de su extracción, suponían el abandono de los combustibles en el

terreno. En este caso, el interés de la biomasa forestal como fuente de energía abre actualmente una puerta para el aprovechamiento de los pies de menor calidad, en los que el uso energético podría suponer un ingreso adicional, y sería una alternativa compatible con el aprovechamiento posterior de los árboles de mejor calidad maderera.

A pesar de la importancia que supone conocer el efecto de la selvicultura y la gestión de los restos generados en la producción y reparto de la biomasa arbórea, y de forma más genérica sobre el propio sistema forestal, debe ser considerada la posible temporalidad del efecto de los tratamientos, así como la acción conjunta de otros factores. En este sentido, algunos de los aspectos más influyentes, de acuerdo con la bibliografía, son: la especie (p.e. Acosta-Mireles *et al.*, 2002; Balboa, 2005; Rodríguez-Soalleiro *et al.*, 2004; Balboa-Murias *et al.*, 2006), la procedencia genética (p.e. Zavitkovski *et al.*, 1981; Thakur y Singh, 2005), la edad (p.e. Montero *et al.*, 1999; Ishii y McDowell, 2002; Porté *et al.*, 2002; Balboa, 2005), la forma de la copa (p.e. Menalled y Kelty, 2001), el tipo de masa (p.e. Alonso *et al.*, 2005), la calidad del sitio (p.e. Zavitkovski *et al.*, 1981; Balboa-Murias *et al.*, 2006), el área de estudio (p.e. Barrio-Anta *et al.*, 2006) o incluso la fracción arbórea considerada (p.e. Montero *et al.*, 1999; Balboa, 2005; Pérez-Cruzado y Rodríguez-Soalleiro, 2011). Por tanto, y dado que la distribución de la biomasa arbórea responde a la acción combinada de diversos factores, internos y externos, resulta difícil realizar una generalización del efecto que pueden tener la selvicultura y la gestión de la biomasa residual sobre la biomasa remanente y, en su conjunto, sobre el sistema forestal intervenido, siendo por tanto necesario realizar estudios más detallados para cada caso concreto. Así, para el caso particular de las masas de *Pinus pinaster* Ait. subesp. atlántica situadas en el noroeste peninsular, algunos de los factores asociados con mayor interés, son: (1) el balance nutricional, por tratarse de suelos mayormente pobres en ciertos nutrientes esenciales; (2) la fijación de CO₂, dado el protagonismo que su cuantificación ha adquirido en los últimos años; y (3) el riesgo de incendio, por la frecuencia de este tipo de eventos en esta zona del territorio. Por ello, considerando el objetivo productivo de las masas estudiadas en la presente tesis doctoral, en las que las podas y las claras son las dos intervenciones selvícolas de mayor importancia, se presenta a continuación una somera introducción sobre la influencia de ambos tratamientos, y la gestión de los restos generados, en el balance nutricional, contenido de CO₂ y riesgo de incendio forestal.

Tal y como se ha comentado, un aspecto destacado en la cuantificación de la biomasa de un sistema forestal sometido a una gestión selvícola de podas y claras es la determinación de la influencia de dichas intervenciones en el **balance nutricional** de la masa intervenida. De forma comparativa, la biomasa residual obtenida en una actividad de poda es cuantitativamente inferior a la generada tras la realización de una clara, independientemente del tipo e intensidad de los tratamientos. Sin

embargo, los restos de la poda, conformados por fracciones de la copa, permiten a corto plazo el mayor aporte de nutrientes al sistema, especialmente por parte de los elementos arbóreos más finos (hojas o acículas y ramillas). La biomasa obtenida tras la realización de una clara, conformada igualmente por elementos de la copa, supone además la obtención de biomasa del fuste, cuyo aporte nutricional adquiere mayor relevancia a largo plazo (Geldres *et al.*, 2006). De acuerdo con esto, el mantenimiento o extracción de los restos generados en estas intervenciones selvícolas tendrá un peso importante en el balance de nutrientes del sistema forestal. Tal y como indica Balboa (2005), desde un punto de vista nutricional, la gran cantidad de nutrientes acumulados en los elementos finos de la copa, ampliamente confirmado en la bibliografía (p.e. Lugo *et al.*, 1990; Fölster y Khanna, 1997; Merino *et al.*, 2003), hace recomendar esquemas de gestión que consideren el mantenimiento de dichas fracciones finas en el sistema forestal tras las intervenciones selvícolas. En suma, de acuerdo con Balboa (2005), la presencia de estas fracciones finas en el terreno ayuda a mantener los contenidos de materia orgánica en el suelo y a la protección de éste frente a procesos erosivos. Otros autores como Hendrickson *et al.* (1985) y Pérez-Batallón *et al.* (2001) van más allá e indican una mayor biomasa microbiana generada por los restos de las operaciones selvícolas, que será adecuada para la mineralización del suelo. Balboa (2005) recoge también que la extracción de la biomasa residual obtenida en las intervenciones selvícolas puede derivar en una reducción de la fertilidad del suelo que afecte a la productividad forestal, en mayor grado para la selvicultura más intensiva, siendo recomendable, en muchos casos, la inclusión de esquemas de fertilización dentro de la gestión de la masa. Como conclusión, este autor recomienda la realización de un aprovechamiento sostenible de la biomasa arbórea mediante una gestión selvícola que asegure la conservación de la capacidad productiva de los suelos, reduciendo los costes nutricionales del aprovechamiento forestal. Por último, aunque en este capítulo solo sea considerado el estrato arbóreo, es importante destacar que la gestión del estrato superficial (constituido por matorral, estrato herbáceo y mantillo) presenta igualmente un papel fundamental para el balance nutricional del sistema forestal.

Expertos en la temática como Montero *et al.* (2005) han destacado también el papel de la gestión selvícola en la **fijación de CO₂** y la mitigación del cambio climático. Hoy en día, es ampliamente aceptado el protagonismo adquirido por las masas forestales en el cambio climático, pero tal y como apuntan Montero *et al.* (2005), las masas intervenidas, y en especial las masas gestionadas para producir madera de calidad, en las que prima la realización de podas y claras, darán lugar a una mayor captación de CO₂. Esto se explica por la gestión de las masas con turnos más largos y por la obtención de productos derivados de mayor vida media, tanto más cuanto mayor sea la calidad de la madera. Sin embargo, de acuerdo con trabajos

como los de Finkral y Evans (2008), y Reinhardt y Holsinger (2010), una correcta evaluación del efecto que tiene la gestión de los combustibles forestales en el balance de carbono (C) de un sistema forestal, requiere considerar un conjunto de factores relacionados, como son los efectos directos de los tratamientos en la reserva de C del sistema, la eficacia de los tratamientos en la limitación de la pérdida de C durante un posible incendio forestal, e incluso el cambio que suponen los propios tratamientos en el balance de secuestro de C. En cualquier caso, ha sido demostrado que, en mayor o menor grado, las diferentes intervenciones que suponen un cambio en la biomasa de un sistema forestal, como pueden ser las podas y las claras, afectan, directa o indirectamente, a la reserva de C del mismo (Reinhardt y Holsinger, 2010), lo que resalta el interés por la cuantificación de dicha reserva para las masas gestionadas bajo estos tratamientos selvícolas. Por último, cabe destacar que a pesar de que el estrato arbóreo representa una parte importante del C acumulado en un sistema forestal, el C total existente en dicho sistema se va a encontrar almacenado no solo en el estrato aéreo (arbóreo y superficial) sino también en la parte subterránea, conformada por las raíces y el suelo. De todos ellos, cabe resaltar el papel de éste último (suelo) como fijador de C, por ser, tal y como apuntan Melillo *et al.* (1996), un punto clave de reciclaje y almacenaje de C, procedente de los procesos de desnitrificación y descomposición de la materia orgánica, con una gran capacidad para secuestrar C y acumularlo por miles de años.

La cantidad de C almacenado en una masa forestal es estimada en ocasiones como un porcentaje de la biomasa existente en esa masa (p.e. Brown y Lugo, 1982; Acosta-Mireles *et al.*, 2002; Singh *et al.*, 2011), siendo ampliamente considerado que el 50% de la materia seca se corresponde con el contenido de C para las diferentes especies forestales. Sin embargo, algunos trabajos han mostrado que estos valores pueden variar en función de la especie (p.e. Montero *et al.*, 2004; 2005; Balboa, 2005; Balboa-Murias *et al.*, 2006), de la fracción arbórea (p.e. Laiho y Laine, 1997; Montero *et al.*, 1999; Ritson y Sochacki, 2003; Montero *et al.*, 2004; Balboa, 2005; Montero *et al.*, 2005; Balboa-Murias *et al.*, 2006) o incluso dentro del mismo árbol y fracción (Bert y Danjon, 2006). Así, por ejemplo, Balboa-Murias *et al.* (2006) observaron que la cantidad de C en masas regulares de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* en Galicia se correspondía con el 51% y 48% del total de la biomasa arbórea de la parte aérea respectivamente, valor ligeramente diferente al 50% tomado habitualmente como referencia.

La realización de podas y claras supone además una modificación de la estructura de la masa forestal, que adquiere una mayor discontinuidad vertical tras la ejecución de la poda, y una mayor discontinuidad horizontal tras la realización de la clara. Esta reducción de la biomasa forestal y la modificación de su disposición en el estrato aéreo (horizontal y vertical) suponen a su vez una reducción del riesgo de inicio y propagación de un *incendio de copas*. Aunque tal y como se ha observado en

diversos estudios (p.e. Van Wagner, 1977; Peterson *et al.*, 2005) la estructura de la masa se encuentra claramente relacionada con el comportamiento del fuego, éste va a estar influenciado a su vez por las condiciones meteorológicas y la topografía del terreno. Sin embargo, dado que no es posible intervenir sobre los factores del medio comentados (meteorología y topografía), la biomasa forestal pasa a ser el elemento clave sobre el que actuar para proteger a la masa forestal frente al fuego. En este sentido, las podas y las claras se consideran las técnicas selvícolas más adecuadas para intervenir en el estrato arbóreo y modificar la estructura de la masa, reduciendo el riesgo de inicio y propagación de un incendio de copas. Por ello, y aunque no se debe olvidar el importante papel del estrato superficial en la susceptibilidad de la masa frente al fuego, las intervenciones de podas y claras son imprescindibles dentro de la selvicultura preventiva aplicada al estrato arbóreo. A pesar de esto, es importante considerar, tal y como apuntan diversos autores (Weatherspoon y Skinner, 1995; Kalabokidis y Omi, 1998; Stephens, 1998, entre otros), que ambos tratamientos selvícolas pueden llevar asociado un incremento del riesgo de incendio. Esto se explica fundamentalmente por la modificación de las condiciones del estrato superficial tras la realización de ambas intervenciones selvícolas. Las razones de la mayor susceptibilidad al fuego en la masa intervenida son básicamente tres: (1) el aumento de la carga de combustible forestal en el estrato superficial, conformado por restos de las operaciones selvícolas (biomasa residual); (2) la mayor influencia del viento, provocando la menor humedad de los combustibles; y (3) la mayor luminosidad, favoreciendo la aparición de vegetación heliófila. De todos ellos, el único factor sobre el que resulta viable actuar para minimizar el riesgo de incendio, en los tratamientos que se analizan en esta tesis, es nuevamente la biomasa forestal (en este caso, biomasa residual). En este sentido, la gestión de los elementos arbóreos más finos adquiere gran importancia, dada la alta inflamabilidad de este material, especialmente cuando se encuentran en un estado seco o muerto, siendo por ello un elemento arbóreo clave en la propagación del fuego. A pesar de que autores como Weatherspoon (1996), o Pollet y Omi (2002), indican que la mayor peligrosidad ante un posible incendio forestal es generada tras la realización de las intervenciones selvícolas comentadas, estos mismos autores afirman que esta peligrosidad tiene un carácter temporal, que irá disminuyendo con la descomposición de los restos. Por otro lado, ambos autores, consideran que los efectos negativos de mantener la biomasa residual en el monte son comparativamente pequeños, y se encuentran compensados por los efectos positivos asociados a la eliminación de los restos y la modificación de la estructura de la masa mediante la selvicultura aplicada. En cualquier caso, de acuerdo con otros trabajos (Graham *et al.*, 1999; Carey y Schumann, 2003; Graham *et al.*, 2004;), en las zonas de alto riesgo de incendio resulta recomendable el tratamiento de la biomasa residual mediante métodos mecánicos, triturando y depositando los restos sobre el suelo. En

realidad, siempre que la topografía del terreno, las condiciones de la masa y los costes lo permitan, la trituración e incorporación de los restos en el sistema forestal será la gestión de la biomasa residual más adecuada, no solo por la protección de la masa frente a un incendio forestal sino también por la protección frente a procesos erosivos y por el importante aporte nutricional que esta operación supone para el sistema. En ningún caso la quema de los restos será una opción defendible, a pesar de su relativa frecuencia en la zona norte peninsular. La realización de este tipo de tratamiento sobre la biomasa residual genera una situación de riesgo de incendio, además de otros efectos negativos sobre el sistema forestal como la pérdida de nutrientes, la generación de CO₂ y el mayor riesgo sanitario.

De los diversos tipos de incendios existentes, los llamados fuegos de copas han mostrado ser la amenaza más directa para la persistencia de las masas arboladas (Peterson *et al.*, 2005). Por ello, adquiere gran importancia la realización de una gestión de las masas que considere medidas de prevención frente a estos eventos. En este sentido, plantear una gestión adecuada requiere conocer las condiciones mínimas necesarias para el inicio y propagación de un fuego de copas. Tal y como indica Van Wagner (1977), se asume que estas condiciones están fuertemente influenciadas por las variables de la estructura de la masa, entre las que destacan: (1) la densidad aparente de la cubierta de copas ("**Canopy Bulk Density**", **CBD**); y (2) la altura de la base de la copa ("**Canopy Base Height**", **CBH**). Estas variables de copa, junto con otras características meteorológicas y topográficas, así como la humedad de las hojas ("**Foliar Moisture Content**", **FMC**), son utilizadas por los diferentes programas de simulación de incendios para predecir si un fuego de superficie se transmite a las copas y, en ese caso, cuál va a ser su evolución. Generalmente, **CBD** y **CBH** presentan cierta dificultad para su cuantificación y definición de una forma precisa (Carey y Schumann, 2003; Cruz *et al.*, 2003b; Reinhardt *et al.*, 2006), al tratarse de variables que no pueden ser medidas directamente en campo. Para solucionar esto, se han desarrollado diversos procedimientos de estimación. La metodología más sencilla para la determinación de **CBD** se basa en suponer una distribución uniforme de los combustibles disponibles en el dosel de copas, siendo el valor de **CBD** el cociente entre la biomasa de los combustibles disponibles (estimada por ejemplo con tarifas de biomasa de árbol individual por fracciones arbóreas) y el volumen que ésta ocupa (obtenido como el producto de la superficie del rodal por la longitud del dosel de copas), incluyendo el espacio entre los árboles. Otro método más complejo, propuesto por Sando y Wick (1972), considera que la distribución vertical de los combustibles disponibles no es uniforme en el rodal y se basa en la estimación del perfil vertical de la densidad aparente de combustibles disponibles en el dosel de copas (**CBD**) para obtener los valores de **CBD** efectivo (**CBDe**) y **CBH**. Utilizando esta metodología, la aplicación "*Fire and Fuel Extension*" del simulador "*Forest*

Vegetation Simulator” (Beukema *et al.*, 1997; Reinhardt y Crookston, 2003) define *CBDe* como el máximo de la distribución vertical de la densidad aparente de combustibles disponibles del dosel de copas. El valor de *CBH*, en este caso, se corresponde con la primera altura a la que se alcanza una densidad aparente determinada, cuyo valor varía entre 0,011 kg/m³ (Beukema *et al.*, 1997) y 0,067 kg/m³ (Williams, 1978), pasando por los 0,037 kg/m³ propuestos por Sando y Wick (1972) y que suelen utilizarse como referencia en la mayoría de los trabajos de estimación de estas variables. La falta de consenso sobre cuál es la densidad aparente de combustible a partir de la cual un incendio de superficie puede pasar a las copas, y de la que dependerá la definición de la variable *CBH*, supone una dificultad añadida en la determinación de esta variable. Además, tampoco existe un acuerdo sobre qué combustibles disponibles en el dosel de copas, con influencia en la propagación de un incendio, deben ser considerados para la determinación de la variable *CBD*. En este sentido, Van Wagner (1977) recoge que el principal combustible de las copas que se quema durante un incendio es el follaje vivo y que poco más llega a quemar excepto en casos de fuegos inusualmente intensos. Este autor añade que cuando existe abundante material muerto en las copas, este material debería ser tenido en cuenta al calcular el valor de *CBD*. Otros autores aconsejan considerar además otros combustibles como líquenes, musgos y una porción de las ramas vivas y muertas de menos de 0,6 cm de grosor (Brown y Bradshaw, 1994; Reinhardt *et al.*, 1997; 2006a). Las diferencias expuestas se deben, en muchas ocasiones, a la dificultad de cuantificar algunos de estos combustibles (Cruz *et al.*, 2003b), lo que implica que en la mayoría de los estudios este tipo de combustibles no sean tenidos en cuenta, siendo por ello escasa la información existente.

Por todo lo anterior, queda clara la importancia de conocer y cuantificar la biomasa existente en una masa forestal y su relación con los diversos factores asociados. Por ello, se recoge a continuación una somera revisión sobre la **determinación de la biomasa** arbórea de un sistema forestal. La estimación de dicha biomasa, entendida como el peso seco de cada componente arbóreo, vendrá influenciada a su vez por otros factores como la especie, el método de estimación o el trabajo de muestreo y de recogida de datos (método de selección de árboles, estado de desarrollo de la masa, tamaño de la muestra y precisión de los aparatos). El empleo de métodos directos para la determinación de la biomasa, ha mostrado ser un proceso difícil y costoso, especialmente cuando se trata de la biomasa radical. Esto ha llevado a la búsqueda de métodos no destructivos más prácticos, eficientes y baratos. De acuerdo con estas pautas, la técnica indirecta más utilizada actualmente para la estimación de la biomasa forestal, es el empleo de modelos matemáticos. La determinación de la biomasa radical es menos frecuente que la aérea, debido principalmente a la mayor dificultad asociada a su cuantificación, así como los elevados costes y el escaso aprovechamiento que supone este tipo de biomasa

(Diéguez-Aranda *et al.*, 2003; Balboa, 2005). Sin embargo, dado que en los últimos años está adquiriendo un mayor interés por su papel como acumulador de C (van Laar y Akça, 1997), su estimación es cada vez más frecuente, siendo habitual utilizar para ello una simplificación que considera su valor como un porcentaje de la biomasa aérea. El valor de este porcentaje suele variar para especies arbóreas entre el 15%, en las estimaciones más conservadoras, hasta valores que pueden superar el 40%, e incluso llegar al 50%, dependiendo de la especie (Montero *et al.*, 2005).

Un primer paso para la construcción de los modelos matemáticos que permiten definir la biomasa forestal es la *determinación del peso seco* del árbol. Se puede hablar de un conjunto de diferentes alternativas que han sido utilizadas para la evaluación de dicho peso. De acuerdo con la revisión realizada por Cunia (1988), las primeras estimaciones fueron efectuadas en base a la experiencia e intuición del estimador, siendo realizados posteriormente muestreos subjetivos de árboles o parcelas, y experimentos diseñados sin objetivos ni metodologías claras. Hoy en día, la técnica más habitual se basa en la realización de inventarios forestales con muestreos diseñados bajo principios estadísticos (De Vries, 1986). Además de estos procedimientos, el uso de las nuevas tecnologías para la estimación de la biomasa forestal (p.e. fotografías aéreas, imágenes de satélite y sistemas de información geográfica) está siendo cada vez más frecuente (Balboa, 2005). Dentro de los procedimientos comentados, a pesar de los avances logrados en las técnicas no destructivas que permiten conocer la biomasa arbórea, sigue siendo necesario acudir a los métodos destructivos, en los que tras el apeo del árbol se realiza el procesado total o parcial del mismo (Balboa, 2005). En este sentido, y de forma general, el procesado parcial tan solo se recomienda para árboles de grandes dimensiones y de acceso restringido, en los que el pesaje total del árbol presenta mayor dificultad (Snowdon *et al.*, 2001).

Para la evaluación de la biomasa arbórea resulta habitual la diferenciación de los *componentes del árbol*, que son separados comúnmente en: follaje (hojas o acículas), ramas (habitualmente diferenciadas por su grosor), madera, corteza y raíces, siendo menos frecuente este último componente por las razones apuntadas con anterioridad (menor aprovechamiento de este tipo de biomasa, estimación difícil y con coste elevado). En la mayoría de los casos, las fracciones que conforman la biomasa aérea son clasificadas según su tamaño, diferenciando generalmente tres tipos de material: (1) material pequeño, que habitualmente comprende las fracciones arbóreas menores de 2 cm de diámetro; (2) material intermedio, para los componentes arbóreos con diámetro entre 2 cm y 7 cm; y (3) material grueso, conformado por los elementos arbóreos mayores de 7 cm de diámetro.

De acuerdo con la detallada revisión realizada por Balboa (2005), existen además algunas metodologías de muestreo específicas, que permiten realizar estimaciones

no sesgadas de la biomasa arbórea. De todas ellas, este autor destaca las denominadas “*Randomized Branch Sampling*” (RBS) e “*Importance Sampling*” (Valentine *et al.*, 1984; Gregoire *et al.*, 1995b), basadas, a grandes rasgos, en la selección de un camino de muestreo desde la base del árbol hasta el extremo final de una rama de la copa, asignando a cada camino una probabilidad de selección.

Los **modelos matemáticos** desarrollados para la determinación de la biomasa total del árbol o de sus diferentes componentes se basan en relacionar el peso seco de cada fracción arbórea, que actúa como variable dependiente o variable a predecir, con variables fáciles de medir en campo, de tipo dendrométrico y dasométrico, que conforman las variables independientes o explicativas del modelo. Las variables regresoras más comúnmente empleadas en los diversos trabajos disponibles en la bibliografía han sido el diámetro normal (d) y, en menor medida, la altura total (h). Asimismo, tal y como se puede comprobar en la bibliografía, las variables explicativas utilizadas en los modelos han dependido, en muchos casos, de las fracciones arbóreas consideradas. Ejemplo de ello serían, entre otros, los trabajos de António *et al.* (2007) o Pérez-Cruzado y Rodríguez-Soalleiro (2011), quienes utilizaron variables de copa para la determinación de los modelos de predicción de las fracciones de la copa, observando una mayor precisión de las ecuaciones al utilizar este tipo de variables. Por otra parte, el empleo de variables de masa para la construcción de modelos de biomasa ha sido menos frecuente. Esto se debe, en parte, a la mayor correlación de las variables dendrométricas con la biomasa arbórea, y a la mayor facilidad de determinación de las variables de árbol a través de un inventario dasométrico. Por todo ello, el uso de variables de masa como variables independientes se ha visto, en cierta manera, limitado (Balboa, 2005). Aun así, existen diversos trabajos que relacionan la biomasa de algunas fracciones arbóreas con variables de masa como la edad (t), la densidad (N) o el índice de sitio (IS) (Ter-Mikaelian y Parker, 2000; Porté *et al.*, 2002; Saint-André *et al.*, 2005; António *et al.*, 2007). Estas ecuaciones presentan la ventaja de poder ser empleadas bajo diferentes situaciones y características de la masa (Ketterings *et al.*, 2001). En definitiva, aunque existen diversas variables dendro y dasométricas utilizadas para la determinación de ecuaciones de biomasa de las diversas fracciones arbóreas, de acuerdo con Pardé (1980), se trata de encontrar, en cada caso, un modelo que permita estimar la biomasa con un comportamiento que responda a una mayor simplicidad y capacidad de ajuste.

A pesar de que se pueden encontrar en la bibliografía una gran variedad de ecuaciones matemáticas para la estimación de la biomasa arbórea (p.e. Cunia y Briggs, 1984; Reed y Green, 1985; Reed *et al.*, 1996), diversos trabajos (Pardé, 1980; Baldwin, 1987; Diéguez-Aranda *et al.*, 2003) han considerado, en un sentido amplio, que todas ellas derivan de un modelo lineal o no lineal (con error aditivo o multiplicativo). Los modelos lineales presentan la ventaja de que algunas teorías

estadísticas han sido desarrolladas únicamente para expresiones de este tipo, mientras que los no lineales muestran la ventaja de proporcionar mejores estimaciones para extrapolaciones fuera del rango de la muestra (Balboa, 2005). En cualquier caso, tal y como indica Cunia (1986), una selección adecuada de ambos tipos de modelos conlleva una validez similar. Dentro de estos modelos, destacan fundamentalmente los llamados transformados logarítmicos, para las ecuaciones de biomasa lineales, y los denominados alométricos o potenciales, para las no lineales. Estos últimos se basan en la hipotética relación alométrica entre la biomasa y determinadas características del árbol, siendo muchos los trabajos que han encontrado una buena precisión en la estimación de la biomasa al utilizar este tipo de ecuaciones (p.e. Reed *et al.*, 1995; Reed y Tomé, 1998; Acosta-Mireles *et al.*, 2002; Zianis y Mencuccini, 2004; Lambert *et al.*, 2005; O'Grady *et al.*, 2006; António *et al.*, 2007; Canga, 2008). La expresión general de los modelos alométricos describe, por tanto, la biomasa de los árboles en función de sus dimensiones, empleando para ello una relación potencial del tipo $y = a_0 \cdot \prod_{i=1}^k x_i^{a_i}$; donde a_0 y a_i son los parámetros a estimar en el modelo; x_i son las variables que definen la dimensión del árbol; e y podría ser la biomasa de cualquiera de los componentes arbóreos.

La biomasa forestal ha sido ampliamente estudiada para distintas especies en todo el mundo (p.e. *Pinus taeda* L. en Brasil (Sanquetta *et al.*, 2002), *Pinus patula* Schl. et Cham. en México (Díaz-Franco *et al.*, 2007), *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, *Eucalyptus viminalis* L. y *Eucalyptus globulus* subesp. *maidenii* en Uruguay (Sans *et al.*, 2007), *Pinus pinaster* Ait. subesp. atlántica en Francia (Lemoine *et al.*, 1986; Porté *et al.*, 2000; 2002) o algunas de las principales especies forestales en España, destacando el trabajo de Montero *et al.* (2005), en donde se pueden encontrar ecuaciones de biomasa para 32 especies forestales de la Península Ibérica, y su revisión (Ruiz-Peinado *et al.*, 2011). En el caso concreto del noroeste peninsular se han desarrollado modelos para estimar la biomasa forestal de especies características como *Betula alba* L. (Cela, 2004; Gómez-García, 2011), *Castanea sativa* Mill. (Cámara, 2006), *Eucalyptus globulus* (Brañas *et al.*, 2000; Balboa, 2005; Cámara, 2006), *Eucalyptus nitens* H. (Deane & Maiden) Maiden (Fernández-Rivas, 2008; Pérez-Cruzado *et al.*, 2009; Pérez-Cruzado y Rodríguez-Soalleiro, 2011), *Pinus pinaster* Ait. (Balboa, 2005; Balboa-Murias *et al.*, 2006; Cámara, 2006), *Pinus radiata* D. Don (Barreiro, 2003; Merino *et al.*, 2003; Balboa-Murias *et al.*, 2006; Cámara, 2006; Canga, 2008) y *Quercus robur* L. (Balboa, 2005; Gómez-García, 2011). Para la especie objeto de estudio en este trabajo, *Pinus pinaster* Ait. subesp. atlántica, las ecuaciones definidas en el norte de España (Balboa, 2005; Balboa-Murias *et al.*, 2006; Cámara, 2006) han considerado para su determinación masas adultas, en las que la distribución de los componentes arbóreos presenta ciertas diferencias con las masas más jóvenes, especialmente para las fracciones de ramas gruesas y ramillas (Crabiffosse, 2009). Por ello, para esta especie, resulta necesaria

la cuantificación de la biomasa forestal de masas más jóvenes, de forma complementaria a las investigaciones realizadas hasta el momento con esta conífera en el norte peninsular.

Tal y como se viene comentando a lo largo de este capítulo, y de acuerdo con lo apuntado por Merino *et al.* (2003), las ecuaciones de biomasa constituyen una valiosa herramienta para facilitar una gestión selvícola que considere la cantidad de restos presentes en una masa forestal de cara a la propagación de plagas, incendios y conservación de suelos. La cuantificación de la biomasa residual con este tipo de ecuaciones resulta a su vez de gran importancia por su relación con el balance de nutrientes o el contenido de CO₂ del sistema forestal gestionado. Por otro lado, y a pesar de la importancia que supone la cuantificación de la biomasa forestal arbórea asociada a las intervenciones selvícolas realizadas, y el efecto que su gestión tiene sobre los diferentes factores asociados, son pocos los estudios publicados hasta el momento sobre esta temática para las principales especies de coníferas presentes en el arco atlántico. En el caso concreto de *Pinus pinaster* Ait. subesp. atlántica se pueden encontrar en la bibliografía los trabajos de Porté *et al.* (2002), Balboa (2005), Balboa-Murias *et al.* (2006) o Barrio-Anta *et al.* (2006), en los que se ha considerado la biomasa existente en masas gestionadas bajo distintos esquemas de claras, y han sido relacionados, en algunos casos, con la influencia de los tratamientos sobre el balance nutricional (Balboa, 2005) y la fijación de CO₂ (Balboa, 2005; Balboa-Murias *et al.*, 2006 y Barrio-Anta *et al.*, 2006). No se han encontrado, sin embargo, trabajos publicados sobre el efecto de las podas en la distribución y cuantificación de la biomasa de esta especie, ni tampoco sobre el efecto de ambos tratamientos selvícolas (podas y claras, solos o combinados) sobre las variables *CBD* y *CBH*, y su relación con el riesgo de inicio y comportamiento de un incendio forestal. La gran ocurrencia de estos eventos, que cada año tiene lugar en las masas de *Pinus pinaster* del territorio español, en especial en la zona noroeste, ha motivado diversos estudios sobre las variables del complejo que influyen en el comportamiento del fuego de superficie de rodales de *Pinus pinaster* en la Península Ibérica (p.e. Fernandes *et al.*, 2004; Fernandes y Rigolot, 2007; Vega *et al.*, 1987; 2008). En cambio, aún son pocos los trabajos relacionados con la estimación de las variables estructurales de la masa (*CBD* y *CBH*) y su relación con los fuegos de copas, siendo además estudios que se han centrado en otras especies de coníferas (*Pinus sylvestris* (Crecente-Campo *et al.*, 2009), *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco (López-Sánchez y Rodríguez-Soalleiro, 2009) y *Pinus radiata* (Ruiz-González y Álvarez-González, 2011)).

Es importante destacar también que los modelos desarrollados hasta el momento permiten estimar la biomasa de los diferentes componentes arbóreos en el total del árbol. Sin embargo, la utilización de dichas ecuaciones se ve limitada cuando se necesita estimar la biomasa existente en una porción del mismo. Tal es el caso de las

podas, en las que la biomasa extraída está conformada por las ramas de la parte inferior de las copas, sin afectar al resto de las fracciones del árbol. En este caso, para una correcta estimación de la biomasa eliminada en la porción podada del árbol, resulta necesario desarrollar ecuaciones que permitan determinar la biomasa de las diferentes fracciones de la copa hasta cualquier altura o diámetro del tronco en la copa. Este tipo de ecuaciones resulta de gran interés al permitir definir el perfil vertical de la biomasa de la copa, que adquiere mayor importancia para las fracciones finas, dado su papel en el balance nutricional y en el riesgo de inicio y propagación del fuego. Además, estos perfiles permiten la estimación de las variables $CBDe$ y CBH para los diferentes criterios de determinación de CBH . Por todo ello, la búsqueda de modelos que relacionen estas variables de la estructura de la copa con variables dasométricas que sean obtenidas habitualmente a partir de los datos de un inventario forestal clásico (edad (t), altura media (h_m) y dominante (H_0), o el número de pies por hectárea (N), entre otros), y que a su vez se encuentren relacionadas con la silvicultura efectuada en una masa forestal (ratio de copa medio (R_{copam}), longitud de copa media (L_{copam}), etc.) permite definir herramientas sencillas que pueden ser utilizadas por los gestores forestales dentro de la planificación de operaciones selvícolas preventivas (Sando y Wick, 1972; Keyes y O'Hara, 2002; Cruz *et al.*, 2003b), facilitando además la caracterización de los combustibles de la copa y la clasificación de las masas por su relativa susceptibilidad a los fuegos de copas, pudiendo comparar la efectividad de distintos tratamientos de gestión del combustible de cara a la reducción del riesgo de incendio.

Una vez conocida la biomasa aérea del árbol individual, se puede calcular la *biomasa forestal aérea*, entendida como el peso de todos los pies de la masa (Balboa, 2005). Otros métodos frecuentemente utilizados para la determinación de la biomasa forestal aérea a una escala geográfica más amplia, se basan en el uso de relaciones conocidas como factores de expansión ("*biomass expansion factors*", *BEFs*) (Lehtonen *et al.*, 2004), que permiten obtener el valor de la biomasa total arbórea a partir del volumen del fuste. Este procedimiento permite simplificar enormemente el trabajo de estimación de la biomasa a gran escala, pero presenta la limitación de que suele aplicarse un factor de expansión constante, sin considerar aspectos como la calidad de estación o la fase de desarrollo de la masa (Satoo y Madgwick, 1982). Otra de las metodologías, conocida como relaciones de proporcionalidad ("*ratio-type estimators*"), se basa en relaciones de escala definidas entre una parte y el todo (Briggs *et al.*, 1987), presentando el inconveniente de obtener valores sesgados de los pesos de las diferentes fracciones (Valentine *et al.*, 1984; Cunia, 1979). Aunque en ocasiones resulta necesaria la estimación de la biomasa forestal a gran escala, tal y como indican Salas e Infante (2006), se hace necesario realizar estimaciones de biomasa locales, dadas las variaciones existentes, asociadas con factores como la forma de los árboles, el tipo de plantación, o las

propias condiciones ambientales. A esto se suma la posible modificación de la biomasa arbórea a través de la gestión selvícola. Por todo ello, es importante llevar a cabo la estimación de la biomasa forestal para cada especie y área geográfica, considerando el carácter dinámico de la producción y distribución de la biomasa durante el desarrollo de la masa, y bajo la influencia de las diferentes perturbaciones (principalmente las condiciones ambientales y la gestión selvícola).

En este contexto, y como ya se comentó anteriormente, se plantea como **objetivo general** de este capítulo elaborar modelos de estimación de la biomasa de las diferentes fracciones arbóreas, para el árbol completo y por alturas, en masas jóvenes regulares de *Pinus pinaster* Ait. en Asturias (noroeste peninsular). Como **objetivos específicos** se proponen: (1) determinar la distribución de la biomasa y el contenido nutricional de los componentes arbóreos del fuste y de la copa; (2) cuantificar la biomasa forestal aérea y el contenido de carbono existentes en masas gestionadas bajo diferentes severidades de poda; (3) caracterizar los valores de *CBDe* y *CBH* para las diferentes intensidades de poda diseñadas; (4) estimar la estructura de la masa mediante las variables *CBDe* y *CBH* para diferentes esquemas de podas y claras simulados; y (5) modelizar el perfil de densidad aparente real de los combustibles finos del dosel de copas (*CBD*), empleando una función de densidad y relaciones entre sus parámetros y variables dasométricas sencillas, que permitan definir dicho perfil para diferentes esquemas selvícolas y criterios de determinación de la variable *CBH*.

6.2. Material y métodos

6.2.1. Datos empleados

Para la determinación de la biomasa aérea y su distribución en el árbol se emplearon datos de peso seco de 28 árboles de *Pinus pinaster* procedentes de las tres parcelas temporales descritas en el capítulo 2 y en el anexo de la presente tesis.

Las mediciones fueron realizadas antes y después del apeo del árbol. Inicialmente, los árboles seleccionados fueron caracterizados mediante la medición de las siguientes variables dendrométricas: diámetro normal (d), altura total (h), altura de la base de la copa (h_{base}), altura de la base de la copa viva (h_{base_v}) y diámetro de copa (D_{copa}). Para estas mediciones se utilizó forcípula de precisión milimétrica (d) y Vertex III de precisión decimétrica (h , h_{base} , h_{base_v} y D_{copa}). También se realizaron anotaciones sobre el estado sanitario, la posición sociológica y la forma del árbol. Tras el apeo del árbol se llevó a cabo la caracterización individual del tocón, las trozas (1 m de longitud) y las ramas, de acuerdo con el esquema presentado en la Figura 6.1 y la metodología descrita en el capítulo 2. La medición de los diámetros de las ramas en su inserción fue realizada mediante

calibre digital mientras que los diámetros del tocón y de las trozas fueron evaluados mediante forcípula. En todos ellos fueron tomadas dos mediciones en cruz. Para la determinación de las longitudes de rama, tocón y troza, se utilizó una cinta métrica. El pesado de las ramas fue realizado en una balanza de precisión 0,01 g mientras que las trozas fueron pesadas con un dinamómetro de precisión 50 g.

Una vez caracterizado el árbol apeado, se procedió a la determinación de una submuestra de las fracciones de la copa y del fuste para su posterior procesado y pesado en laboratorio. La submuestra de la copa estuvo conformada por la primera rama viva y la primera rama muerta de cada troza, que fueron fraccionadas y pesadas en campo, diferenciando acículas, ramillas (separando fracciones con diámetros de 0 a 0,3 cm y de 0,3 a 0,6 cm), ramas finas (diámetros entre 0,6 y 2 cm) y ramas gruesas (distinguiendo fracciones con diámetros de 2 a 7 cm y mayores de 7 cm). Al tratarse de una muestra de árboles jóvenes, la fracción de ramas gruesas estuvo conformada únicamente por ramas de 2 cm a 7 cm, no habiendo encontrado ramas de grosor superior a 7 cm. También se observó, en un análisis previo, que la diferenciación de las fracciones de ramillas de 0-0,3 cm y de 0,3-0,6 cm dificultaba la obtención de ecuaciones de biomasa que relacionasen dichos elementos finos con variables dendrométricas bajo las premisas de precisión y sencillez. Sumado a esto, la dificultad asociada a la diferenciación exacta de ambas fracciones en campo, llevó a considerar finalmente una única fracción de ramillas (fracciones con diámetros hasta 0,6 cm). Todas estas fracciones de copa fueron empaquetadas por separado en bolsas plásticas, etiquetadas y selladas con cinta aislante, para evitar la mayor pérdida de humedad posible. Por otra parte, la submuestra del fuste seleccionada para ser llevada al laboratorio estuvo conformada por 5 discos transversales cortados a diferentes alturas del árbol (tocón, diámetro normal, comienzo de la copa, copa máxima y en un punto aleatorio de la parte superior de la copa, situado entre la copa máxima y el ápice). Todos los discos fueron perfectamente etiquetados para su identificación posterior en laboratorio.

Todas las submuestras (fracciones de las ramas y discos), pesadas en estado húmedo en campo, fueron llevadas a laboratorio para su posterior procesado y secado en estufa a 65°C hasta peso constante. Previamente al secado de los discos, se procedió a la separación de la madera y la corteza para la determinación de su peso fresco por separado (peso en campo de forma conjunta). Tras el secado de todas las fracciones se realizó su pesado para la determinación del peso seco. La temperatura de secado permitió preparar una submuestra de cada fracción arbórea, procedente de nueve de los árboles apeados (tres de cada parcela), para el análisis nutricional de la misma. Este análisis fue externalizado a un laboratorio acreditado.

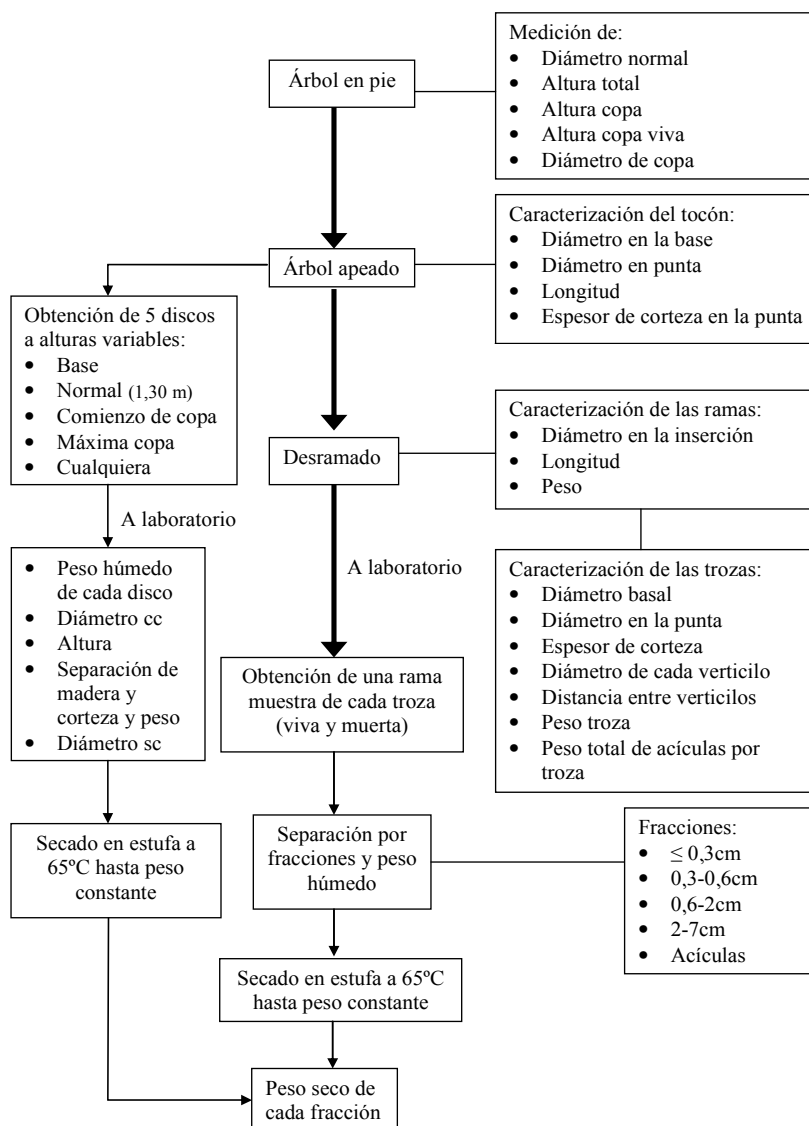


Figura 6.1. Procedimiento general de muestreo y toma de datos para la determinación de la biomasa arbórea aérea de *Pinus pinaster*.

Un punto muy importante en la construcción de las ecuaciones predictivas de los componentes de la biomasa arbórea es la correcta determinación de la materia seca (Linerós, 1986). Las fracciones arbóreas consideradas en este estudio han sido diferentes para los distintos objetivos planteados. Así, para la definición de las ecuaciones de biomasa aérea, para el árbol completo y por alturas, y su posterior aplicación en la estimación del perfil de densidad aparente de los combustibles finos disponibles (*CBD*), y de las variables *CBDe* y *CBH*, fueron definidas las fracciones: madera, corteza, ramas de la copa (ramas finas de 0,6 cm a 2 cm y ramas gruesas de 2 cm a 7 cm) y finos de la copa (ramillas < 0,6 cm y acículas). A pesar de no ser habitual el ajuste de una ecuación para la biomasa correspondiente con ramillas y acículas (denominada en este trabajo finos de la copa), la importancia de estas fracciones en el inicio y propagación de los incendios de copas (Scott y Reinhardt, 2001) hizo que se optara por el ajuste de un modelo que considerara ambas

fracciones de forma conjunta, y permitiese así su estimación posterior de una forma más práctica y directa de cara a la determinación de las variables *CBDe* y *CBH*, y su relación con el riesgo de inicio y propagación de un incendio de copas. Por otra parte, para la definición de la distribución real de las fracciones del fuste y de la copa para el árbol completo, así como la distribución real de la biomasa de copa por alturas, y el contenido de nutrientes de cada fracción, fueron considerados los elementos arbóreos de madera, corteza, ramas gruesas (2-7 cm), ramas finas (0,6-2 cm), ramillas (< 0,6 cm) y acículas. Estas fracciones fueron empleadas a su vez para la determinación de la biomasa total aérea y el contenido de C a nivel de masa, en los ensayos permanentes de podas y claras, siendo empleados para ello los datos dendrométricos de los inventarios realizados en dichas parcelas experimentales durante el invierno 2005-2006, antes y después de poda, y los inviernos 2008-2009 y 2010-2011 después de poda. Por último, para el estudio de la distribución de la carga de los combustibles finos en el dosel de copas, y la simulación de la modificación de dicha distribución para diferentes tratamientos de podas y claras, se utilizaron los datos dendrométricos de cada subparcela de poda. Estos datos, a nivel de subparcela, fueron a su vez utilizados para la modelización del perfil de densidad aparente real de los combustibles finos del dosel de copas. Las principales características de las parcelas de ensayo se encuentran descritas en el capítulo 2 y en el anexo de este trabajo. Los principales estadísticos descriptivos de los datos empleados para el estudio de la biomasa arbórea de la parte aérea de *Pinus pinaster* se muestran en la Tabla 6.1. En la Figura 6.2 se representa la distribución altura total-diámetro normal de la muestra de árboles seleccionada y en las Figuras 6.3 a 6.5 se presentan los valores del peso seco de las diferentes fracciones arbóreas frente a las variables dendrométricas diámetro normal (*d*) y altura total (*h*).

Tabla 6.1. Estadísticos descriptivos de los 28 árboles de *Pinus pinaster* empleados para la estimación de la biomasa arbórea aérea del presente estudio.

Estadístico	<i>d</i>	<i>h</i>	<i>R_{copa}</i>	<i>W_m</i>	<i>W_c</i>	<i>W_{rg}</i>	<i>W_{rf}</i>	<i>W_{rm}</i>	<i>W_{ac}</i>	<i>W_{re}</i>	<i>W_{fc}</i>
Media	9,18	7,57	0,81	12,09	2,95	0,46	1,82	0,70	3,19	2,28	3,89
Mínimo	4,15	3,06	0,46	1,05	0,39	0,00	0,38	0,10	0,41	0,38	0,62
Máximo	15,20	11,53	0,96	37,13	8,00	5,23	4,75	1,83	13,25	9,98	13,67
Desv. Std.	3,00	2,51	0,11	9,24	1,92	1,05	1,02	0,49	2,66	1,93	2,86

donde *d* es el diámetro normal, medido a 1,30 m sobre el nivel del suelo, en cm; *h* es la altura total, en m; *R_{copa}* es el ratio de copa, calculado de acuerdo con lo descrito en el capítulo 2; *W_i* es el peso seco total de cada componente arbóreo o agrupación de fracciones consideradas, en kg, de acuerdo con la nomenclatura recogida en el glosario de términos; Desv. Std. es la desviación estándar de la variable considerada (*d*, *h*, *R_{copa}*, etc.).

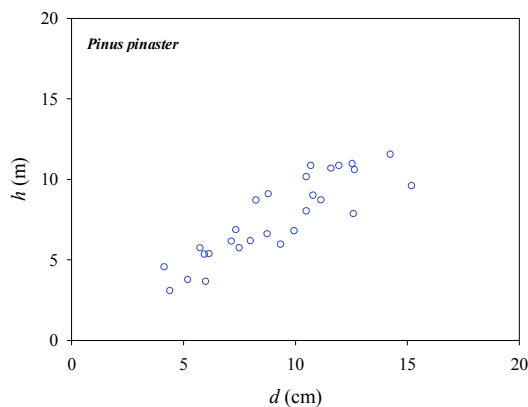


Figura 6.2. Gráfico de dispersión entre el diámetro normal (d , cm) y la altura total (h , m) de la muestra de 28 árboles de *Pinus pinaster* utilizada para el estudio de la biomasa arbórea aérea.

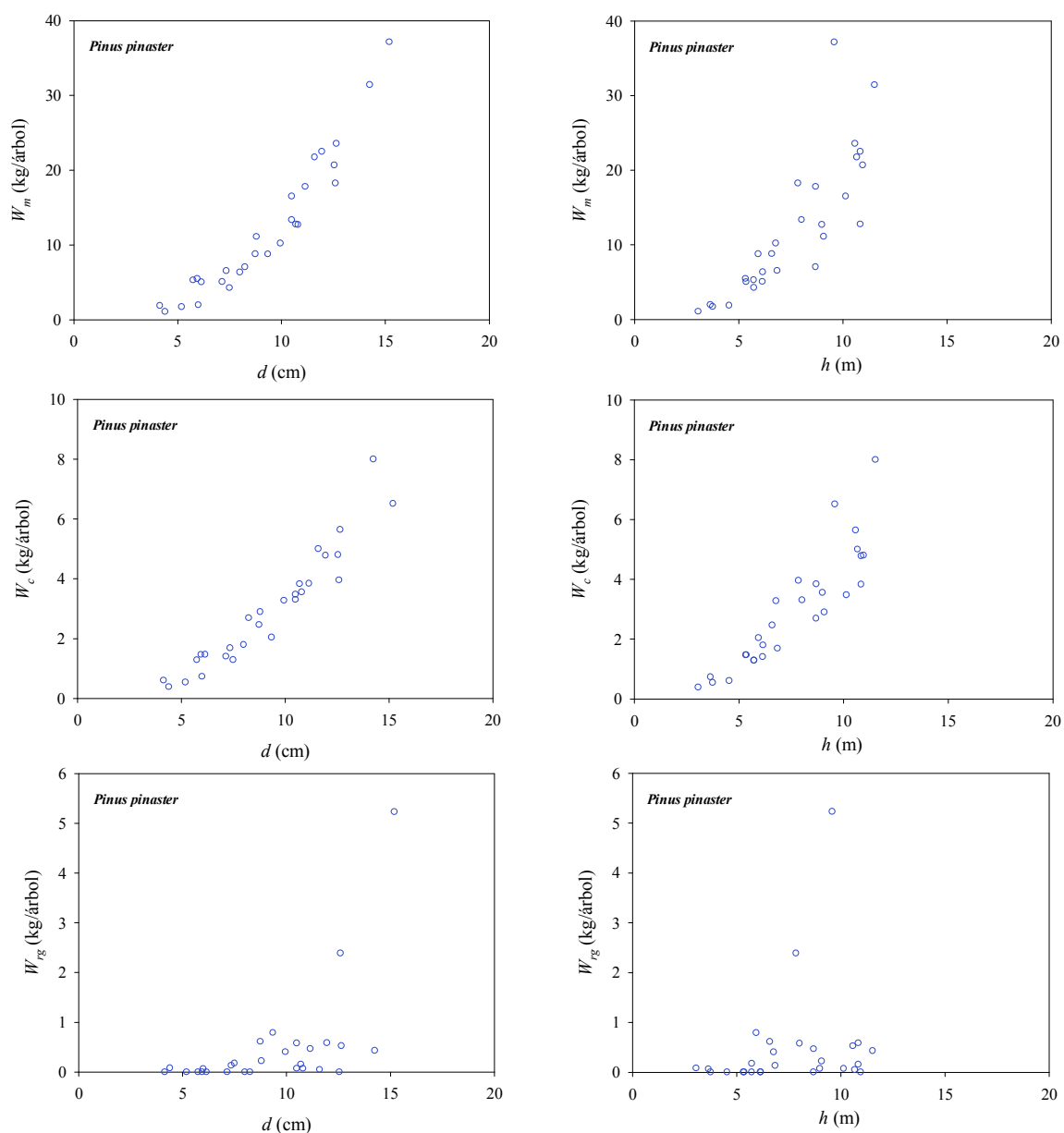


Figura 6.3. Representación gráfica del peso seco (kg/árbol) de madera (1ª fila), corteza (2ª fila) y ramas gruesas (3ª fila) frente al diámetro normal (d , cm) (columna izquierda) y la altura total (h , m) (columna derecha) de los 28 pies de *P. pinaster* empleados para el estudio de la biomasa arbórea.

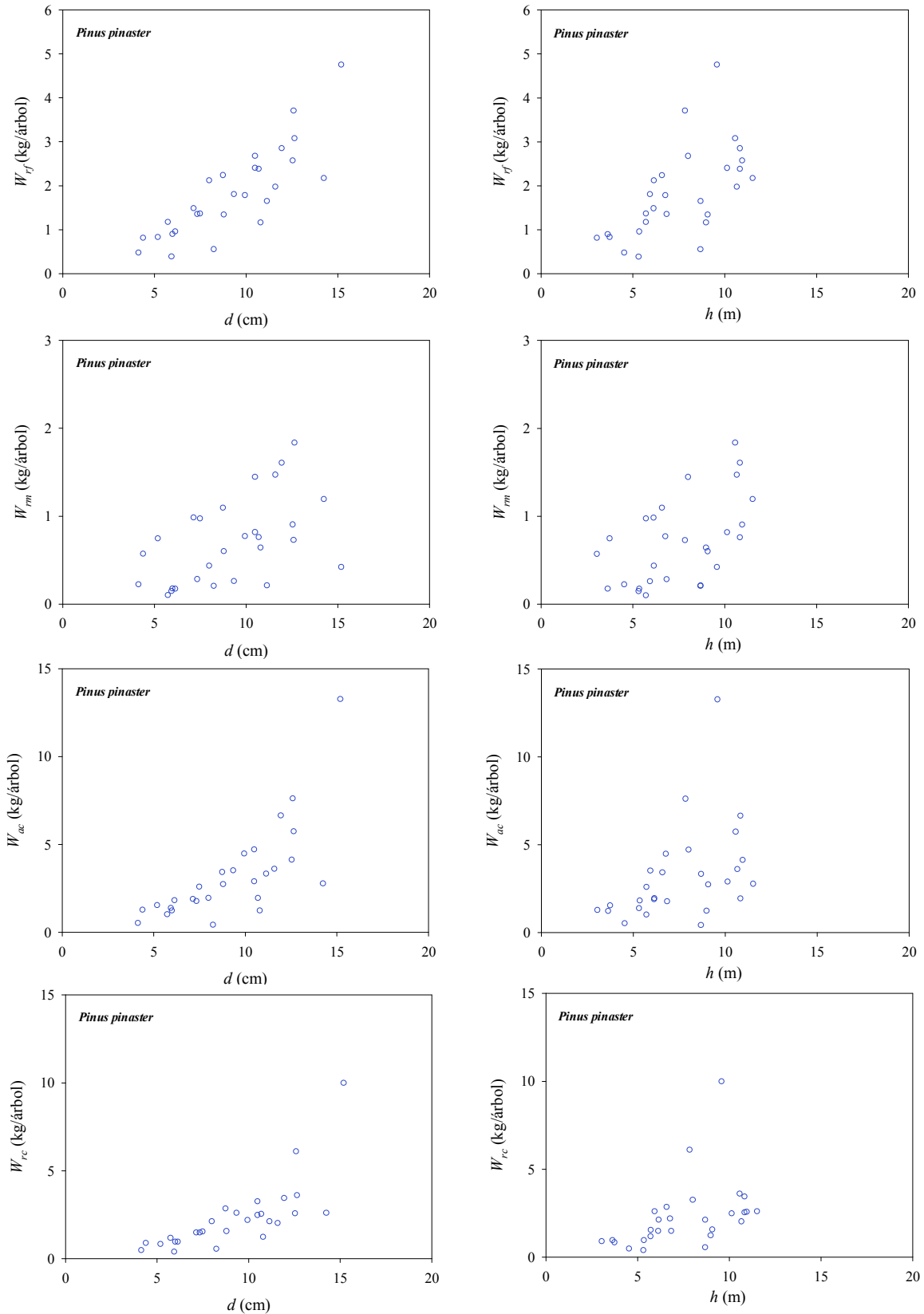


Figura 6.4. Representación gráfica del peso seco (kg/árbol) de ramas finas (1ª fila), ramillas (2ª fila), acículas (3ª fila) y ramas de la copa (4ª fila) frente al diámetro normal (d , cm) (columna izquierda) y la altura total (h , m) (columna derecha) de los 28 pies de *P. pinaster* empleados para el estudio de la biomasa arborea.

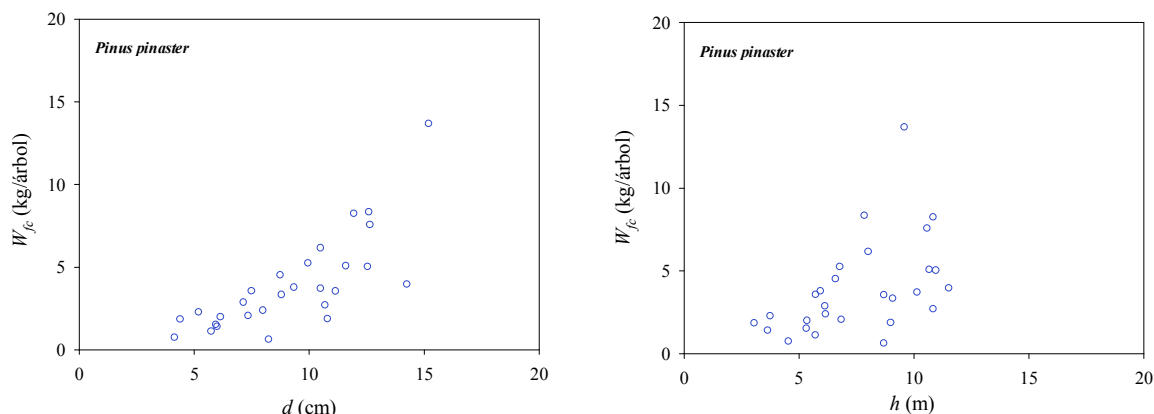


Figura 6.5. Representación gráfica del peso seco (kg/árbol) de los finos de la copa frente al diámetro normal (d , cm) (izquierda) y la altura total (h , m) (derecha) de los 28 pies de *P. pinaster* empleados para el estudio de la biomasa arbórea.

6.2.2. Tratamiento de los datos

Los datos comentados en el apartado anterior han sido utilizados con varios objetivos. En primer lugar, los valores de peso seco de las fracciones del fuste y de la copa, diferenciadas en madera, corteza, ramas de la copa y finos de la copa, así como las variables dendrométricas medidas en campo (d , h , h_{base} , h_{base_v}) y otras variables de árbol estimadas a partir de éstas (longitud de copa, total (L_{copa}) y viva (L_{copa_v}), y R_{copa}), cuyo cálculo ha sido explicado en el capítulo 2, fueron empleados con el fin de construir modelos de estimación de biomasa arbórea. Los modelos de biomasa para el árbol completo precisaron de los datos de peso total de cada una de las fracciones comentadas, mientras que las ecuaciones hasta una altura límite fueron ajustadas únicamente para las fracciones de la copa, empleando para ello los datos de peso seco definidos para cada metro de la troza hasta el diámetro en punta delgada aproximado de 4 cm, a partir del cual el peso seco de cada componente sumado a la biomasa de dicha fracción acumulada hasta dicha troza se correspondería con el total de la biomasa existente para cada elemento en el árbol.

Por otra parte, fueron utilizados los valores de peso seco de madera, corteza, ramas gruesas, ramas finas, ramillas y acículas, así como el peso seco de las fracciones conjuntas del fuste y de la copa, siendo todos ellos comparados con los valores de biomasa total, extrayendo así la proporción de cada fracción en el árbol, con el fin de analizar la distribución real de cada componente.

Asimismo, los valores de peso seco de los diferentes elementos arbóreos y los resultados del análisis químico de la submuestras de árboles preparada con este fin, fueron empleados para la estimación del contenido de los principales macro y micronutrientes de cada fracción del fuste (madera y corteza) y de la copa (ramas gruesas, ramas finas, ramillas y acículas).

Por otro lado, los datos dendrométricos obtenidos en los diversos inventarios realizados en cada parcela de ensayo permanente de *Pinus pinaster* fueron utilizados para la aplicación de las ecuaciones de biomasa definidas en este trabajo, con el fin de determinar la biomasa forestal y el contenido de C, así como la producción anual de biomasa y de fijación de C para cada sitio de ensayo durante el período de tiempo inventariado (desde el invierno 2005-2006 hasta el invierno 2010-2011).

Por último, los datos dendrométricos de las parcelas, trabajando a escala de subparcela de poda, fueron empleados para la estimación del perfil de densidad aparente de combustible fino disponible (*CBD*), la determinación de las variables *CBDe* y *CBH*, y la cuantificación de las variables de intensidad lineal crítica y velocidad crítica, para la situación real de poda y para una situación simulada de podas y claras. Por una parte, como situación real, fueron consideradas las intensidades de poda definidas en el diseño experimental de los ensayos (0%, 20%, y 40% de la copa viva), cuya descripción más detallada se encuentra recogida en el apartado 2.2 del capítulo 2. Por otra parte, para la situación simulada, se plantearon intensidades de poda (% de L_{copa} eliminada) y clara (% de G eliminada) de 0% a 60%, de 10% en 10%, para las diferentes combinaciones de ambas intervenciones selvícolas. Finalmente, los valores dendrométricos de cada parcela y las variables de rodal para cada subparcela de poda fueron utilizados para la construcción de modelos de estimación que permitiesen definir el perfil de distribución vertical de la densidad aparente de los combustibles disponibles del dosel de copas, y, a partir del mismo, la determinación de las variables *CBDe* y *CBH*.

Para el análisis de los datos ha sido utilizado el paquete estadístico SAS 9.1[®] (SAS Institute Inc., 2004 a;b), mientras que la representación gráfica se ha llevado a cabo mediante el programa SigmaPlot 10.0[®] (Systat Software Inc., 2006).

A continuación se describe la metodología empleada para alcanzar cada uno de los objetivos específicos fijados anteriormente.

6.2.2.1. Modelización de la biomasa arbórea aérea

6.2.2.1.1. Ajuste individual de la biomasa aérea del árbol completo

Para el análisis del árbol completo se procedió al ajuste de ecuaciones alométricas diferentes para cada una de las fracciones arbóreas consideradas (madera, corteza, finos de la copa y ramas de la copa).

Dada la relación existente entre la biomasa observada y diversas variables dendrométricas medidas se optó por linealizar los modelos alométricos, mediante el empleo de logaritmos, y aplicar el método de selección de variables regresoras “*stepwise*” del procedimiento REG del programa estadístico SAS/STAT[®] (SAS Institute Inc., 2004b) para realizar así una regresión paso a paso que permitiese

determinar las variables más influyentes en la estimación (diámetro normal (d), altura total (h), altura de la base de la copa (h_{base}), altura de la base de la copa viva (h_{base_v}), longitud de copa (L_{copa}), longitud de copa viva (L_{copa_v}), ratio de copa (R_{copa}) y diámetro de copa (D_{copa})), y seleccionar así el mejor modelo para cada fracción.

Una vez hecha esta selección, se realizó el ajuste individual de cada componente arbóreo, expresando los modelos en su forma alométrica y utilizando como variables independientes las determinadas en el paso anterior. Para llevar a cabo los ajustes se empleó el procedimiento MODEL del programa SAS/ETS[®] (SAS Institute Inc., 2004a). Asimismo, en todos los modelos ajustados individualmente, se procedió a la determinación y corrección de la heterocedasticidad (falta de homogeneidad de la varianza), problema que, tal y como se explicó en el capítulo 2, se presenta frecuentemente en el ajuste de ecuaciones de biomasa arbórea. En este trabajo se llevó a cabo la evaluación de la heterocedasticidad de los modelos a través del test de White (1980). Así, para las ecuaciones que resultaron heterocedásticas de acuerdo con este test, se realizó un ajuste de regresión ponderada, por ser éste uno de los métodos más ampliamente utilizados para la corrección de la heterocedasticidad (Schlaegel, 1982; Clutter *et al.*, 1983; Cunia, 1986; Parresol, 1999), especialmente en los estudios más recientes de estimación de biomasa arbórea (p.e. Balboa-Murias *et al.* 2006; Canga, 2008; ; Pérez-Cruzado y Rodríguez-Soalleiro, 2011). La metodología a seguir con esta técnica ha sido explicada en el apartado 2.6.5.2 del capítulo 2. La estimación del exponente de los pesos para cada fracción arbórea fue realizado mediante mínimos cuadrados ordinarios, utilizando el procedimiento REG del paquete estadístico SAS/STAT[®] (SAS Institute Inc., 2004b). En cada caso, fueron probados diferentes combinaciones de variables independientes, en función de aquellas que interviniesen en cada modelo, siendo realizado el test de White (1980) para cada uno de ellos mediante el procedimiento MODEL del programa SAS/ETS[®] (SAS Institute Inc., 2004a). Finalmente, y de acuerdo con el resultado del contraste de White (1980), se procedió a la selección del factor de ponderación más adecuado para cada modelo.

6.2.2.1.2. Ajuste individual de la biomasa aérea del árbol hasta una altura límite

Para la estimación de la biomasa por fracciones, hasta una cierta altura en el tronco, resulta habitual el uso de ecuaciones que multiplican la biomasa total de la fracción arbórea correspondiente por una función de ponderación (que varía entre 0 y 1) que depende, entre otras cosas, de la altura límite considerada. En el presente trabajo, no se han ajustado ecuaciones de estimación hasta una cierta altura límite para las fracciones de madera y corteza, considerando que la estimación de la biomasa acumulada de estas fracciones sería mucho más fiable al utilizar las funciones de perfil definidas para la especie (Arias, 2009), junto con ecuaciones que

relacionen la densidad de su madera con la altura (pendientes de determinar en trabajos futuros). Para la estimación de la biomasa de las fracciones de copa hay que tener en cuenta que la función de ponderación debe tomar el valor 0 para la base de la copa y el valor 1 para el ápice del árbol, y no como en las fracciones de madera que tendría un valor de 0 para la base del árbol. En la Figura 6.6 se muestra esta diferencia apuntada para la distribución de las fracciones del fuste y de la copa a lo largo del árbol.

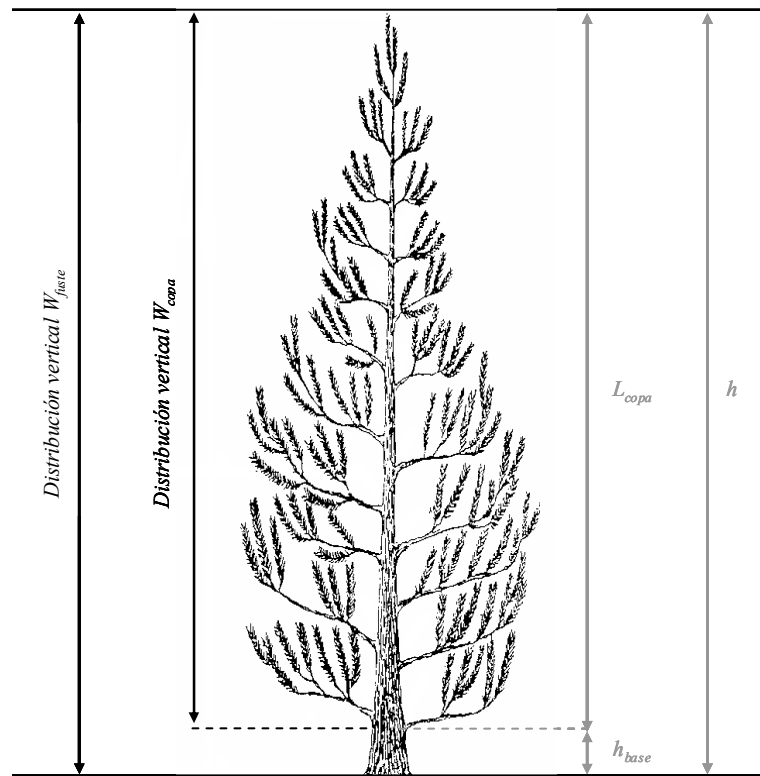


Figura 6.6. Distribución vertical de los componentes arbóreos de la parte aérea: biomasa del fuste (W_{fuste}) y biomasa de la copa (W_{copa}).

Como función de ponderación se puede utilizar cualquier ecuación con un crecimiento sigmoide y que presente una asíntota horizontal en 1 y un punto de inflexión. El proceso de elección de dicha función de ponderación comenzó con una revisión de las diferentes funciones que cuentan con esas características (Normal, Lognormal, Gamma, Weibull). De todas ellas, y atendiendo a la bibliografía consultada (Schreuder y Swank, 1974; Vose, 1988; Gillespie *et al.*, 1994; Baldwin *et al.*, 1997; Xu y Harrington, 1998; Yang *et al.*, 1999; Zhang *et al.*, 2004), fue finalmente seleccionada la función de distribución de Weibull con dos parámetros, que ha sido destacada por diversos autores por su sencillez, fácil aplicación y flexibilidad (Gillespie *et al.* 1994; Crabiffosse, 2009), así como por su buen comportamiento para la estimación de la biomasa de copa a lo largo del árbol (p.e. Gary, 1978; Gillespie *et al.*, 1994) y su superioridad frente a otras funciones de distribución (Schreuder y Swank, 1974).

La formulación de esta ecuación, de acuerdo con la nomenclatura empleada para este estudio, ha sido:

$$F(x; b, c) = 1 - e^{-(x/b)^c} \quad (6.1)$$

donde x es la variable aleatoria; y b y c son los parámetros a estimar.

Para una fracción concreta de biomasa, la forma de la distribución acumulativa, sería:

$$\frac{W_{hi}}{W_i} = 1 - e^{-(h_i'/b)^c}, \text{ con } h_i' = (h_i - h_{base})/L_{copa} \quad (6.2)$$

donde W_{hi} es la biomasa de la fracción de copa considerada, acumulada hasta una posición específica de la copa, en kg; W_i es la biomasa de esa fracción para el total del árbol, en kg; h_i' es la altura relativa (0-1) a lo largo de la longitud de la copa (L_{copa} , en m). Esta altura empieza a partir de la base de la copa (h_{base} , en m); h_i es la altura hasta la que determinar la biomasa, en m; y b y c son los coeficientes de estimación. En concreto, b es el parámetro de escala y c el parámetro de forma de la función de distribución de Weibull.

El parámetro c describe la forma de la distribución mientras que el parámetro b refleja el tamaño de las unidades en que se mide la variable aleatoria (altura relativa) y suele ser cercano a su valor medio.

La función de distribución de Weibull nos permite estimar la biomasa existente desde un punto cualquiera del árbol hasta el ápice del mismo. Esto permite utilizar esta función para las fracciones de la copa teniendo en cuenta la diferente distribución vertical de estos componentes. Para ello, es necesario restringir las ecuaciones de manera que la biomasa estimada tenga el valor mínimo en la base de la copa y el máximo en el ápice del árbol. Para la determinación de las fracciones de copa, se impuso la restricción de que la altura límite debía de estar siempre por encima de la base de la copa del árbol. Así, la formulación final del modelo fue:

$$\begin{cases} W_{hi} = 0 & \text{si } h_i \leq h_{base} \\ W_{hi} = W_i \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{h_i'}{b}\right)^c} \right) & \text{si } h_i > h_{base} \\ W_{hi} = W_i & \text{si } h_i = h \end{cases} \quad (6.3)$$

donde W_{hi} es la biomasa hasta una altura límite de la fracción de la copa i , en kg; W_i es la biomasa total de la fracción de la copa i , en kg. Cada componente i se corresponde con la nomenclatura recogida en el glosario; h_i' es la altura relativa límite, utilizada para el cálculo de la biomasa de las fracciones de la copa hasta dicha altura. Su valor empieza a partir de la base de la copa (h_{base} , en m) y termina en la altura total del árbol (h , en m); h_i es la altura hasta la que determinar la biomasa, en m; y b y c son los parámetros de estimación.

La Figura 6.7 trata de mostrar los criterios que han sido considerados para la definición de la Ecuación (6.3).

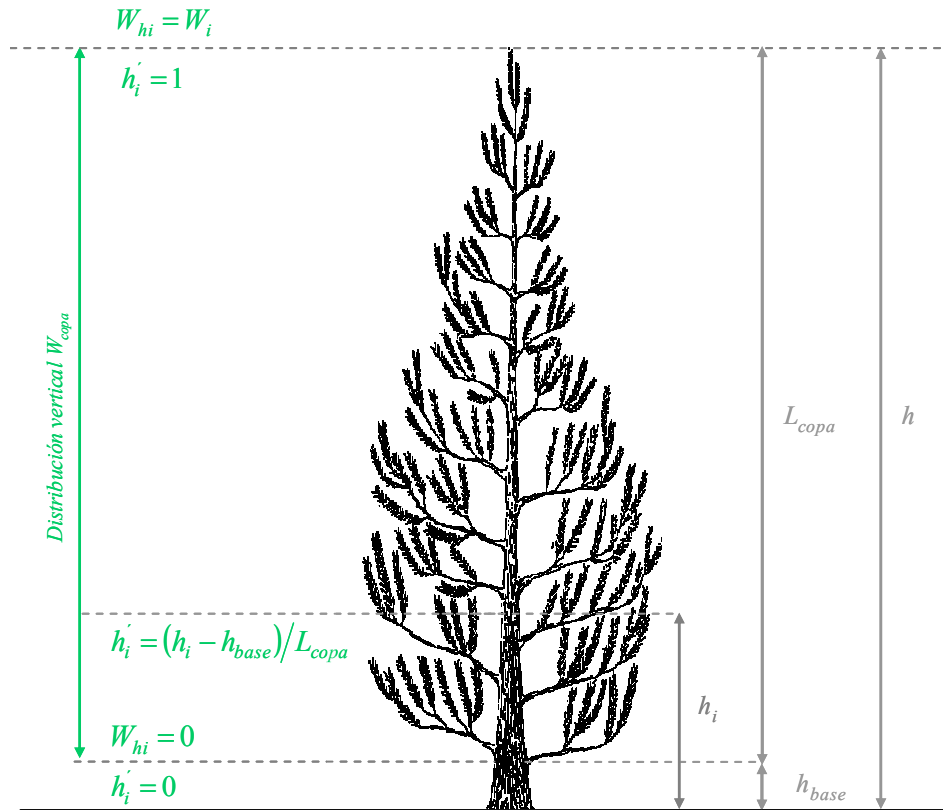


Figura 6.7. Restricciones definidas para las funciones de estimación de las fracciones de la biomasa de copa la hasta una altura límite (color verde).

El ajuste de los modelos de biomasa acumulada, para las fracciones de ramas y finos de la copa, fue realizado mediante el procedimiento MODEL del paquete estadístico SAS/ETS® (SAS Institute Inc., 2004a).

6.2.2.1.3. Ajuste simultáneo de la biomasa aérea del árbol completo y hasta una altura límite

Las ecuaciones de biomasa que presentaron los mejores resultados en el ajuste individual de cada fracción arbórea, para la biomasa del fuste, en el árbol completo, y para la biomasa de la copa, en el árbol completo y por alturas, fueron ajustadas de forma simultánea. Para ello, en este trabajo, fue utilizado el método de máxima verosimilitud con información completa FIML (término en inglés, “*Full Information Maximum Likelihood*”), con el objetivo de optimizar las predicciones de la biomasa arbórea de las fracciones consideradas, para el árbol completo y hasta una altura límite del mismo. Estos modelos fueron ajustados de forma ponderada, con los pesos que permitieron la ausencia de heterocedasticidad en el ajuste individual de la biomasa del árbol completo, para las ecuaciones que inicialmente hubiesen mostrado

ser heterocedásticas. Asimismo, las ecuaciones de las fracciones del fuste, definidas para el total del árbol, fueron ponderadas con el número de datos empleados, dado el diferente número de datos existente para cada árbol en el ajuste de las ecuaciones para una altura límite. Para las fracciones de biomasa de finos y ramas de la copa hasta una altura límite, al existir múltiples mediciones para el mismo árbol, fue modelizado el término del error empleando una estructura autorregresiva (AR(q)) con el fin de corregir la posible correlación entre observaciones. Se empleó un modelo autorregresivo debido a que la separación entre mediciones era equidistante e igual al tamaño de las trozas empleadas, con la excepción de la última medición en la que ese valor era ligeramente diferente.

Para la selección de la estructura autorregresiva más adecuada se determinó el valor del estadístico de Durbin-Watson (Durbin y Watson, 1951), estableciendo como criterio rechazar la existencia de autocorrelación entre los residuos con un $\alpha = 0,05$. Para este trabajo, se planteó elegir el orden más bajo capaz de corregir parte de la autocorrelación. Finalmente fue ajustado un sistema de ecuaciones conformado por los modelos de las fracciones arbóreas madera y corteza, para el árbol completo, y las fracciones de la copa, agrupadas en ramas y finos, para el árbol completo y hasta una altura determinada. Para el ajuste fue utilizado el procedimiento MODEL del paquete estadístico SAS/ETS® (SAS Institute Inc., 2004a).

6.2.2.1.4. Evaluación de los modelos

Para la evaluación de los modelos ajustados de forma individual y simultánea fueron analizados los estadísticos raíz cuadrada del error medio cuadrático (*REMC*) y el coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}). Las expresiones de ambos estadísticos han sido recogidas en el capítulo 2.

Asimismo, se llevó a cabo un análisis gráfico de los modelos. Con este fin, se representaron gráficamente los valores observados frente a los valores predichos para las ecuaciones de biomasa ajustadas para el árbol completo y hasta una altura límite (si el ajuste es insesgado, los datos deberían seguir una diagonal perfecta).

Para poder valorar la capacidad predictiva de los modelos es necesario realizar la validación de los mismos mediante la utilización de un conjunto independiente de datos (Vanclay y Skovsgaard, 1997; Pretzsch *et al.*, 2002). Esto es posible cuando se cuenta con un número suficiente de datos, que pueda ser diferenciado en dos grupos, uno para el ajuste de los modelos y el otro para su validación. De acuerdo con esto, se optó por no validar los modelos planteados en este trabajo, siendo necesario esperar a tener un conjunto de datos mayor que permita valorar la capacidad predictiva de las ecuaciones ajustadas, sin que esto suponga una reducción en la precisión de las mismas.

6.2.2.2. Caracterización de la distribución real de la biomasa arbórea aérea y de su contenido de nutrientes

6.2.2.2.1. Distribución y acumulación de la biomasa del fuste y de la copa para el árbol completo y hasta una altura determinada

En un primer análisis fue considerada la biomasa total existente para cada fracción arbórea, diferenciando los elementos del fuste (madera y corteza) y de la copa (ramas y finos). Para la biomasa de la copa, se distinguieron a su vez las fracciones de ramas, en ramas finas y gruesas, y la de finos, en ramillas y acículas. Los datos utilizados se correspondieron con la muestra de 28 árboles empleada previamente para el ajuste de las ecuaciones de biomasa del presente estudio. La distribución de cada componente arbóreo fue analizada y representada gráficamente en función del tamaño diamétrico de cada árbol.

En un paso posterior, se llevó a cabo el análisis de la distribución vertical de la biomasa de la copa, a partir de los datos de biomasa por alturas tomados en campo en la muestra de 28 árboles seleccionada para este trabajo. En este análisis fueron diferenciadas nuevamente las fracciones de ramas gruesas, ramas finas, ramillas y acículas. Para cada una de ellas, se definió la función de distribución de Weibull (Ecuación (6.3)), ajustada para los datos reales de campo mediante el procedimiento MODEL del paquete estadístico SAS/ETS® (SAS Institute Inc., 2004a).

6.2.2.2.2. Balance nutricional de las fracciones de biomasa arbórea aérea

Todas las fracciones del fuste y de la copa fueron relacionadas con el reparto nutricional de los principales macro y micronutrientes existentes en dichos componentes arbóreos, de acuerdo con los análisis químicos realizados en una submuestra enviada a analizar a un laboratorio externo acreditado. La submuestra empleada estuvo conformada por nueve árboles (tres de cada sitio de ensayo), siendo consideradas, en todos ellos, las fracciones arbóreas de madera, corteza, ramas gruesas, ramas finas, ramillas y acículas.

De los diferentes elementos analizados, fueron seleccionados para este trabajo, los macro y micronutrientes siguientes: nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), hierro (Fe), manganeso (Mn), zinc (Zn), cobre (Cu) y boro (B).

6.2.2.2.3. Biomasa y fijación de carbono a nivel de masa

Las ecuaciones de biomasa total definidas en este trabajo para las fracciones del fuste y de la copa de cada árbol fueron empleadas para la cuantificación de la biomasa forestal, entendida como la suma de la biomasa de cada árbol del rodal (t/ha). Esta biomasa forestal fue estimada para cada una de las parcelas permanentes

de ensayo de *Pinus pinaster* del SERIDA. Para ello, fueron utilizados los datos dendrométricos procedentes de los inventarios realizados en cada uno de los sitios de ensayo durante los inviernos de 2005-2006, antes y después de poda, y los inviernos de 2008-2009 y 2010-2011 después de poda.

Por otro lado, fueron utilizados los resultados de concentración de C obtenidos en el análisis químico de las diferentes fracciones arbóreas, a partir de los cuales se llevó a cabo la estimación de la concentración de C para cada elemento arbóreo. Con este valor de C por fracción, y haciendo uso de los datos de biomasa forestal previamente determinados para las parcelas permanentes de ensayo, fue estimado el C total presente en cada rodal (t/ha).

Con los datos de biomasa total (t/ha) y C total (t/ha), estimados para el conjunto de árboles de cada parcela, fue determinado el porcentaje de C contenido en la biomasa arbórea total.

Asimismo, se llevó a cabo la estimación de la biomasa producida (t/ha año) y el C fijado (t/ha año) durante el período de estudio (inviernos 2005-2006 a 2010-2011).

Por último, se realizó la cuantificación de la biomasa extraída durante la intervención de poda efectuada en el invierno 2005-2006 en cada parcela permanente de ensayo. Para ello, se determinó la proporción de biomasa de copa extraída, diferenciando cada tipo de fracción arbórea. Los tratamientos de poda fueron evaluados en función de la severidad real del tratamiento, agrupada en 15%, 30% y 45%, y para el conjunto de las intervenciones, sin diferenciar su intensidad.

6.2.2.3. Distribución de la densidad de combustibles finos en el dosel de copas

La determinación de la distribución de la densidad de los combustibles finos en el dosel de copas resulta de gran interés para el estudio de la susceptibilidad de una masa forestal frente al fuego. Tal y como se comentó en la parte introductoria de este capítulo, existen dos variables estructurales de la copa (*CBDe* y *CBH*) que son esenciales para poder predecir si un fuego de superficie se transmite a las copas y, en caso de ser así, cómo va a evolucionar. Ninguna de esas dos variables puede ser medida directamente en campo, siendo necesaria su estimación. Para este trabajo se ha adoptado la metodología propuesta por Sando y Wick (1972), quienes consideraron que la distribución vertical de los combustibles disponibles no es uniforme en el rodal, debiendo estimar un perfil vertical de distribución de la densidad aparente de los combustibles finos, a partir del cual se obtienen los valores de *CBDe* y *CBH*. De acuerdo con estos autores, junto con la aplicación “*Fire and Fuel Extension*” del simulador “*Forest Vegetation Simulator*” (Beukema *et al.*, 1997; Reinhardt y Crookston, 2003), *CBDe* fue considerado como el máximo del

perfil de distribución vertical de la densidad aparente de los combustibles finos de la copa. Para obtener dicho perfil fueron definidas capas de 0,3 metros, desde el suelo hasta la altura máxima del dosel de copas, calculando la densidad de los combustibles finos de la copa existente en cada capa como el cociente entre la biomasa de esos combustibles y el volumen que ocupan (superficie de cada parcela multiplicada por 0,3 m). Para estimar la carga de combustibles de cada capa fueron empleadas las ecuaciones determinadas en este trabajo para la estimación de la biomasa de finos de la copa hasta una altura límite. Las variables dendrométricas necesarias para la determinación de la biomasa de finos, fueron obtenidas de los inventarios realizados en los inviernos 2005-2006, antes y después de poda, y 2008-2009 así como 2010-2011, después de poda, en las parcelas permanentes de *Pinus pinaster* del SERIDA.

Cuando el perfil de densidad aparente obtenido es irregular resulta habitual realizar un suavizado del mismo empleando una media corrida con una ventana de 4,5 metros. De acuerdo con esto, para el presente estudio se decidió optar por esta técnica tan solo en el caso de que dicho perfil mostrara ser realmente muy irregular. Por último, el valor de *CBH* considerado en este trabajo ha sido el propuesto por Sando y Wick (1972), correspondiente con la primera altura a la que se alcanza una densidad aparente de $0,037 \text{ kg/m}^3$ (Figura 6.8). Todas las variables y cálculos realizados fueron determinados a nivel de subparcela de poda (nivel de trabajo descrito en el capítulo 2).

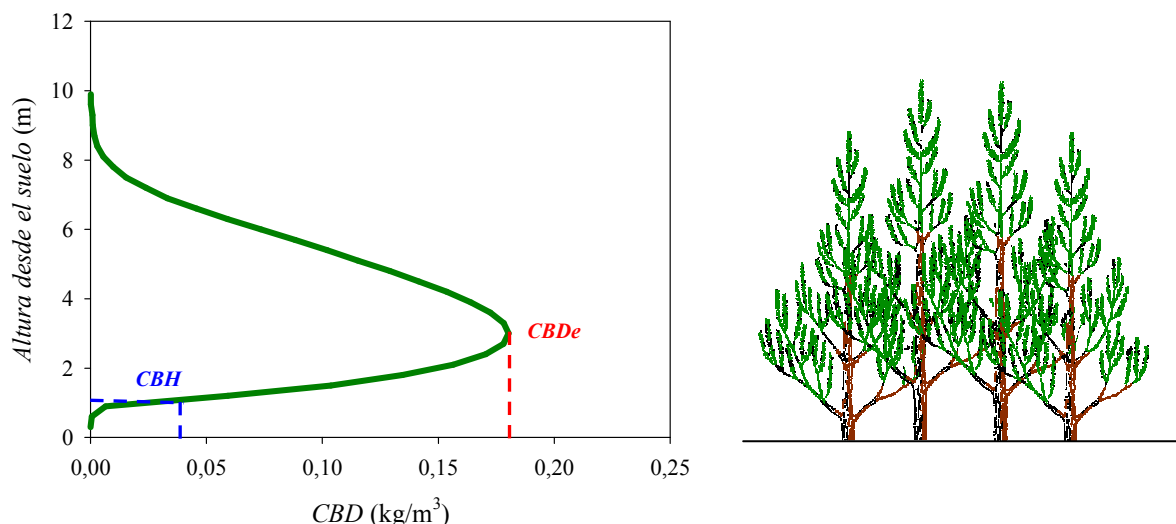


Figura 6.8. Perfil de densidad aparente del combustible fino disponible en el dosel de copas (*CBD*, kg/m^3) para una hipotética masa joven regular de *Pinus pinaster*. El valor de *CBDe* es el máximo del perfil y el valor de *CBH* es la primera altura a la que se alcanza una densidad aparente de $0,037 \text{ kg/m}^3$.

6.2.2.3.1. Estimación del perfil de densidad aparente del combustible fino, y las variables *CBDe* y *CBH*: situación real (podas) y simulada (podas y/o claras)

Los perfiles de densidad aparente del combustible fino disponible (*CBD*), y las variables *CBDe* y *CBH*, fueron estimados para la situación real, antes y después de poda, así como para diferentes escenarios de podas y claras simulados. Tanto la situación real como la situación simulada fueron analizadas en las cuatro parcelas permanentes de *Pinus pinaster*, a nivel de subparcela de poda. En el primer caso, se realizaron los cálculos para la situación real de la parcela antes de poda (invierno 2005-2006), denominada control, y para la situación posterior a los tratamientos (inviernos 2005-2006, 2008-2009 y 2010-2011 después de poda), considerando las intensidades de poda diseñadas para cada subparcela (0%, 20% y 40% de L_{copa}). En el segundo caso, fueron simulados diferentes esquemas de gestión de podas y claras, considerado intensidades de poda con extracciones de copa en intervalos de 10% (de 0% a 60%), y tratamientos de clara baja, con extracciones de área basimétrica (G) en intervalos de 10% (de 0% a 60%). Las simulaciones fueron realizadas a partir de los datos del inventario efectuado durante el invierno 2005-2006.

Por último, se realizó un análisis de varianza para las variables *CBDe* y *CBH*, para la situación real, antes y después de poda, y para los diferentes tratamientos de podas y/o claras simulados. En el primer caso, para el análisis de varianza de ambas variables de copa, se consideraron como factores fijos la poda diseñada (tres niveles) y la parcela (4 sitios de ensayo), y como factor aleatorio la subparcela de poda (64 subparcelas). En el segundo caso, se incluyeron como factores fijos los tratamientos simulados (49 tratamientos) y la parcela de ensayo (4 rodales) y como factor aleatorio la subparcela de poda (64 subparcelas). Este análisis de varianza fue realizado, para ambas situaciones, real y simulada, mediante el procedimiento MIXED del paquete estadístico SAS/STAT® (SAS Institute Inc., 2004b). Las características dasométricas de las parcelas, así como la descripción del diseño seguido para la realización de la poda, se encuentran descritos en el capítulo 2.

De acuerdo a los resultados obtenidos en las simulaciones comentadas, se llevó a cabo una representación gráfica de los perfiles de densidad aparente, considerando los diferentes tratamientos de podas y/o claras simulados, para una subparcela de poda con una densidad aparente intermedia. Por otra parte, fue representado gráficamente el valor de *CBDe* en función de la densidad remanente ($N_{remanente}$) y el área basimétrica remanente ($G_{remanente}$), para los escenarios de clara simulados, a partir de los datos del inventario realizado en el invierno 2005-2006 en la red de parcelas permanentes de *Pinus pinaster*.

6.2.2.3.2. Estimación de la intensidad lineal crítica y la velocidad crítica: situación real (podas) y simulada (podas y/o claras)

Los valores de intensidad lineal crítica (I'_L) y velocidad de propagación crítica (R'_{activo}) fueron estimados en la situación real (podas), antes y después del tratamiento, así como la situación simulada, considerando diferentes esquemas de podas y/o claras para cada subparcela de ensayo (explicados en el subapartado anterior). De esta manera, fue analizado el efecto de los tratamientos selvícolas considerados sobre los valores de ambas variables y, por consiguiente, sobre el riesgo de inicio y propagación de un fuego de copas.

El conocimiento del valor de I'_L resulta clave para la fase de iniciación de un fuego de copas. Así, y de acuerdo con el criterio de Van Wagner (1977), I'_L constituye el límite crítico de intensidad del fuego de superficie a partir del cual es previsible que dicho incendio se transmita a las copas. La estimación de los valores de I'_L fue efectuada de acuerdo con el modelo de Rothermel (1972), explicado en mayor detalle en el capítulo 2 (apartado 2.6.4.5), y cuya expresión de cálculo, es:

$$I'_L = \left[\frac{CBH \cdot (460 + 25,9 \cdot FMC)}{100} \right]^{3/2} \quad (6.4)$$

donde I'_L es la intensidad lineal crítica, en kw/m; CBH es la altura de la base de la copa (“*Canopy Base Height*”), en m; y FMC es la humedad foliar (“*Foliar Moisture Content*”), en %.

Una vez que el fuego de superficie se ha transmitido a las copas, y atendiendo al criterio de Van Wagner (1977) para la fase de propagación, R'_{activo} se corresponde con el límite crítico de velocidad de propagación necesaria para que ese incendio llegue a ser un fuego de copas activo. Para la determinación de los valores de R'_{activo} fue utilizado el modelo de Rothermel (1991), basado en Rothermel (1972), explicado en el capítulo 2 (apartado 2.6.4.5), y cuya formulación matemática, es:

$$R'_{activo} = \frac{3}{CBDe} \quad (6.5)$$

donde R'_{activo} es la velocidad de propagación crítica, en m/min; y $CBDe$ es el valor máximo de la distribución vertical de la densidad aparente del combustible fino disponible en el dosel de copas (“*Canopy Bulk Density*”, CBD), en kg/m³.

Para la determinación de I'_L y R'_{activo} tan solo fue considerada la influencia de las variables estructurales $CBDe$ y CBH , para una situación de condiciones atmosféricas, topográficas y de humedad de los combustibles constante.

6.2.2.3.3. Ajuste y modelización de la función de densidad de Weibull

Un último paso en este capítulo ha sido la modelización de la función de densidad de probabilidad (*pdf*) de Weibull mediante el ajuste de ecuaciones que relacionen sus parámetros con variables de rodal sencillas de determinar a partir de variables tomadas en campo. Los valores de biomasa de los combustibles finos para la construcción del perfil de densidad aparente fueron obtenidos al aplicar las ecuaciones de biomasa hasta una altura límite definidas previamente en este trabajo. Para ello, fueron empleados los valores dendrométricos obtenidos en los inventarios realizados en las parcelas permanentes de *Pinus pinaster*. Una vez obtenidas las distribuciones verticales de densidad aparente de cada una de estas parcelas, para cada inventario realizado antes y después de poda, se realizó el ajuste de la función de Weibull, de acuerdo con la siguiente expresión matemática:

$$CBD_{rel} = \left(\frac{c}{b}\right) \cdot \left(\frac{h_i - a}{b}\right)^{c-1} \cdot e^{-\left(\frac{h_i - a}{b}\right)^c} \quad (6.6)$$

donde CBD_{rel} es la densidad aparente relativa de combustibles finos del rodal, en tanto por uno, a la altura h_i medida desde el suelo, en m; a es la altura mínima a partir de la cual los valores de la función de densidad son mayores que 0 (en este trabajo, a se hizo coincidir con 0,3 metros, altura del primer estrato); b es un parámetro de escala y c un parámetro de forma.

Las estimaciones de los parámetros b y c se han obtenido por mínimos cuadrados empleando el procedimiento NLIN del paquete estadístico SAS/STAT® (SAS Institute Inc., 2004b).

Como no se conoce el tipo de relación existente entre los parámetros de la función de densidad y las variables de rodal, se planteó el ajuste de modelos lineales, realizando una selección previa del mejor conjunto de variables regresoras de cada modelo mediante el método de selección de variables “*stepwise*”, a través del procedimiento REG del paquete estadístico SAS/STAT® (SAS Institute Inc., 2004b).

Con los parámetros obtenidos para esta función, fue realizado un análisis de varianza considerando un nivel de significación $\alpha = 95\%$, mediante el procedimiento MIXED del paquete estadístico SAS/STAT® (SAS Institute Inc., 2004b), evaluando la posible existencia de diferencias significativas en los valores de ambos parámetros (b y c) en función de la intensidad de poda diseñada e inventario.

Por último, se ha analizado la bondad del ajuste de estas funciones modelizadas al compararlas con las observadas mediante el empleo del test Kolmogorov-Smirnov.

Evaluación de los modelos

La evaluación de los modelos ajustados se basó nuevamente en el análisis de los estadísticos raíz cuadrada del error medio cuadrático (*REMC*) y coeficiente de

determinación ajustado (R^2_{adj}), cuyas expresiones de cálculo han sido recogidas en el capítulo 2 (apartado 2.6.5.5).

6.3. Resultados y discusión

6.3.1. Modelización de la biomasa arbórea aérea

6.3.1.1. Ajuste individual de la biomasa aérea del árbol completo

Tras el primer ajuste de regresión de los modelos linealizados, y empleando el criterio de selección de variables independientes “*stepwise*” fueron seleccionados los modelos que figuran en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2. Modelos seleccionados en la primera fase del análisis.

Fracción	Modelo	
Madera	$W_m = a_0 \cdot d^{b_0} \cdot h^{c_0}$	(6.7)
Corteza	$W_c = a_1 \cdot d^{b_1} \cdot h^{c_1}$	(6.8)
Ramas de la copa	$W_{rc} = a_2 \cdot d^{b_2} \cdot R_c^{c_2}$	(6.9)
Finos de la copa	$W_{fc} = a_3 \cdot d^{b_3} \cdot R_c^{c_3}$	(6.10)

donde W_i es el peso seco total del componente arbóreo i , en kg, de acuerdo con la nomenclatura recogida en el glosario de términos; d es el diámetro normal, en cm; h es la altura total, en m; R_{copa} es el ratio de copa; y a_j ($j = 1, 2, 3$) son los parámetros del ajuste.

Como era de esperar, y tal y como se observó en otros trabajos similares (p.e. Corona *et al.*, 2002; Balboa-Murias *et al.*, 2006; António *et al.*, 2007), el diámetro normal (d) resultó ser la mejor variable para la estimación de la biomasa arbórea. La alta relación de este diámetro con las diferentes fracciones del fuste y de la copa (p.e. Prado *et al.*, 1987; Parresol, 1999; Snowdon *et al.*, 2001), junto con su fácil determinación en campo han hecho que se trate de una de las variables más empleadas para los modelos de estimación de la biomasa arbórea (António *et al.*, 2007). Algunos autores como Landsberg y Waring (1997), o Vidal *et al.* (2002), asumen que d es suficiente para obtener predicciones de la biomasa arbórea fiables. Otros como Reed y Tomé (1998), Monserud y Marshall (1999), y Alonso *et al.* (2005), han encontrado una mejora significativa en el ajuste de los modelos cuando la altura total (h) es utilizada también como variable explicativa. En línea con esto, Satoo y Madgwick (1982) afirman que la utilización conjunta de d y h muestra una buena relación para la mayoría de los componentes de biomasa arbórea. En el presente estudio, la consideración de h , junto con d , mejoró la precisión obtenida para las fracciones del fuste, pero no para los componentes de la copa. Esta consideración fue recogida también en trabajos como los de Ter-Mikaelian y Parker

(2000), Pitt y Bell (2004), Lambert *et al.* (2005) o António *et al.* (2007). Por otro lado, algunos autores como, por ejemplo, Jokela *et al.* (1986), Ter-Mikaelian y Korzukhin (1997), Verwijst y Telenius (1999), Porté *et al.* (2002) o Jenkins *et al.* (2003), defienden que la utilización de h como variable independiente adicional solo aporta precisión marginal a la capacidad predictiva de las ecuaciones de biomasa. Snowdon *et al.* (2001) añaden también que la existencia de cierta correlación entre ambas variables (d y h) conlleva a que h no complemente a d todo lo que sería deseable para la estimación de la biomasa. En este trabajo, la mejor precisión para las fracciones de la copa fue observada al considerar variables de copa como variables explicativas de los modelos. Esta mejora fue apuntada igualmente por autores como António *et al.* (2007) o, más recientemente, Pérez-Cruzado y Rodríguez-Soalleiro (2011). En el presente trabajo, la variable de copa finalmente seleccionada fue el ratio de copa (R_{copa}), dada su utilidad en masas gestionadas selvícilmente, en las que la proporción existente entre la longitud de copa (L_{copa}) y h llega a cambiar, en mayor o menor grado, como consecuencia de las intervenciones selvícolas efectuadas, siendo por tanto una variable de interés para las masas objeto de estudio en esta tesis, gestionadas bajo una selvicultura de podas y claras. Esta variable de copa ha sido utilizada también para la estimación de los diferentes componentes de la copa por otros autores como, por ejemplo, Carvalho y Parresol (2003). Estudios como los de Clark (1982), Satoo y Madgwick (1982), Pitt y Bell (2004), Muñoz-Riveros *et al.* (2005) o Madrigal *et al.* (2006), mostraron buenos ajustes para las fracciones de la copa al emplear diámetros diferentes al d (diámetro en la base de la copa viva o diámetro en la base del árbol, entre otros). Autores como Pitt y Bell (2004), y Muñoz-Riveros *et al.* (2005), optaron por el empleo de variables de copa principalmente para la estimación de la biomasa foliar. En otros casos, la biomasa de las hojas fue determinada a partir de variables de más difícil medición como el área de los vasos conductores (sección de albura) (p.e. Robichaud y Metheven, 1992; Berninger y Nikinmaa, 1994; Dvorak *et al.*, 1996; Rayachhetry *et al.*, 2001; Schneider *et al.*, 2011) o la proporción de luz que pasa a través de las copas (Martens *et al.*, 1993). En este último caso, se trata de modelos desarrollados habitualmente para campos de estudio más específicos, relacionados generalmente con la ecofisiología, que presentan una menor utilidad práctica por la dificultad que conlleva la determinación de sus variables.

Además de las variables dendrométricas comentadas, diversos estudios han empleado variables dasométricas como variables explicativas de los modelos de biomasa, principalmente densidad (N), edad (t) e índice de sitio (IS). Ejemplo de ello son los trabajos de Ter-Mikaelian y Parker (2000), Porté *et al.* (2002), Saint-André *et al.* (2005) o António *et al.* (2007), entre otros. Este tipo de ecuaciones presentan la ventaja de poder ser utilizadas para la estimación y comparación de la biomasa existente en masas con diferentes características dasométricas (Ketterings *et al.*,

2001). Sin embargo, en este trabajo, la inclusión de este tipo de variables no tiene sentido al trabajar únicamente con una muestra de tres parcelas.

Una vez ajustados individualmente los modelos seleccionados para las fracciones arbóreas consideradas (Tabla 6.2), se comprobó la existencia de heterocedasticidad mediante el test de White (1980) para las fracciones de madera y corteza, siendo ajustadas nuevamente mediante regresión ponderada. Para ello, fueron probados diferentes factores de ponderación en función de las variables independientes que intervenían en cada modelo (en este caso, d y h) (Tabla 6.3).

Tabla 6.3. Factores de ponderación probados en los ajustes de regresión ponderada de las ecuaciones de biomasa seleccionadas para las fracciones de madera y corteza.

Variables independientes del modelo	Factor de ponderación
d, h	d^{-k} $(d^2 \cdot h)^{-k}$

donde d es el diámetro normal, en cm; h es la altura total, en m; y k es el exponente del factor de ponderación.

Finalmente, de acuerdo con la prueba de White (1980), se determinaron los factores de ponderación a utilizar en el ajuste de cada fracción del fuste (madera y corteza), de manera que el valor obtenido en el contraste de White (1980) fuese no significativo ($p = 0,1946$ para madera; $p = 0,1225$ para corteza), lo que indicaría la corrección de la heterocedasticidad previamente detectada para el ajuste sin pesos de los mismos componentes ($p = 0,0276$ para madera; $p = 0,0044$ para corteza).

En la Tabla 6.4 se recogen las ecuaciones finalmente empleadas para el ajuste individual de las fracciones del fuste, con los factores de ponderación seleccionados para la regresión ponderada de los mismos, y los modelos utilizados en el ajuste de los componentes de la copa mediante regresión sin ponderar.

Tabla 6.4. Ecuaciones de biomasa ajustadas individualmente mediante regresión ponderada, para las fracciones del fuste (madera y corteza), con los factores de ponderación seleccionados, y sin ponderar, para las fracciones de la copa (ramas y finos).

Fracción	Modelo	Factor de ponderación	(6.11)
Madera	$W_m = 0,34682 \cdot d^{2,130445} \cdot h^{0,468326}$	$1/d^{2,08}$	(6.12)
Corteza	$W_c = 0,0236 \cdot d^{1,434431} \cdot h^{0,75797}$	$1/(d^2 \cdot h)^{0,87}$	(6.13)
Ramas de la copa	$W_{rc} = 0,00783 \cdot d^{2,740057} \cdot R_{copa}^{3,270979}$	-	(6.14)
Finos de la copa	$W_{fc} = 0,037139 \cdot d^{2,176618} \cdot R_{copa}^{11,477743}$	-	(6.15)

donde W_i es el peso seco total del componente arbóreo i , en kg, de acuerdo con la nomenclatura recogida en el glosario de términos; d es el diámetro normal, en cm; h es la altura total, en m; y R_{copa} es el ratio de copa.

La Tabla 6.5 muestra los valores de los estadísticos de bondad de ajuste ($REMC$ y R^2_{adj}) para cada una de las ecuaciones ajustadas individualmente, de acuerdo con las expresiones matemáticas y los factores de ponderación recogidos en la Tabla 6.4.

Tabla 6.5. Estadísticos de bondad de ajuste resultantes del ajuste individual ponderado, para las fracciones del fuste, y sin ponderar, para las fracciones de la copa, en el árbol completo.

Fracción	Porción del árbol	$REMC$	R^2_{adj}
Madera	Árbol completo	1,7984	0,9621
Corteza	Árbol completo	0,3789	0,9608
Ramas de la copa	Árbol completo	0,8034	0,8270
Finos de la copa	Árbol completo	1,6477	0,6688

donde $REMC$ es la raíz cuadrada del error medio cuadrático; y R^2_{adj} es el coeficiente de determinación ajustado.

6.3.1.2. Ajuste individual de la biomasa aérea del árbol hasta una altura límite

La función de distribución de Weibull probada en este trabajo (Ecuación (6.3)) mostró buenos resultados en la estimación de las fracciones de la copa consideradas (ramas y finos).

En la Tabla 6.6 se muestran las ecuaciones finales para la biomasa de estas fracciones ajustadas individualmente hasta una altura límite:

Tabla 6.6. Expresión de los modelos de biomasa ajustados hasta una altura límite para las fracciones de la copa de *Pinus pinaster* mediante la función de distribución de Weibull.

Fracción	Modelo
Ramas de la copa	$W_{hrc} = W_{rc} \cdot \left(1 - \exp \left(- \left(\frac{h_i'}{0,53022} \right)^{2,369893} \right) \right) \quad (6.16)$
Finos de la copa	$W_{hfc} = W_{fc} \cdot \left(1 - \exp \left(- \left(\frac{h_i'}{0,640628} \right)^{2,842068} \right) \right) \quad (6.17)$

donde W_{hi} es la biomasa hasta una altura límite para la fracción i de la copa, en kg; W_i es la biomasa total del componente i de la copa, en kg, de acuerdo con la nomenclatura recogida en el glosario; h es la altura total del árbol, en m; y h_i' es la altura relativa límite, en m, empleada en el cálculo de la biomasa de las fracciones de la copa hasta dicha altura límite. Su valor empieza a partir de la base de la copa (h_{base} , en m) y termina en la altura total del árbol (h , en m) (ver Ecuación (6.2)).

La Tabla 6.7 muestra los valores de los estadísticos de bondad de ajuste ($REMC$ y R^2_{adj}) para cada una de las ecuaciones de biomasa hasta una altura límite ajustadas individualmente, y cuyas expresiones matemáticas se recogen en la Tabla 6.6.

Tabla 6.7. Estadísticos de bondad de ajuste resultantes del ajuste individual de las fracciones de la copa (ramas y finos) de *Pinus pinaster* hasta una altura límite.

Fracción	Porción del árbol	REMC	R^2_{adj}
Ramas de la copa	Hasta una altura límite	0,3574	0,9377
Finos de la copa	Hasta una altura límite	0,5838	0,9526

donde $REMC$ es la raíz cuadrada del error medio cuadrático; y R^2_{adj} es el coeficiente de determinación ajustado.

6.3.1.3. Ajuste simultáneo de la biomasa aérea del árbol completo y por alturas

La última fase de estimación de las ecuaciones de biomasa, para las fracciones del fuste y de la copa, se llevó a cabo mediante el ajuste simultáneo de los modelos definidos para el árbol completo y hasta una altura límite, cuya expresión general se muestra en el siguiente sistema de ecuaciones:

Tabla 6.8. Sistema de ecuaciones de las fracciones de biomasa aérea del fuste y de la copa de *Pinus pinaster*, para el árbol completo y por alturas, ajustado de forma simultánea.

Fracción	Porción del árbol	Modelo	
Madera	Árbol completo	$W_m = a_0 \cdot d^{b_0} \cdot h^{c_0}$	(6.18)
Corteza	Árbol completo	$W_c = a_1 \cdot d^{b_1} \cdot h^{c_1}$	(6.19)
	Árbol completo	$W_{rc} = a_2 \cdot d^{b_2} \cdot R_{copa}^{c_2}$	(6.20)
Ramas de la copa	Hasta una altura límite	$W_{hrc} = W_{rc} \cdot \left(1 - \exp \left(- \left(\frac{h_i'}{b_{21}} \right)^{c_{21}} \right) \right)$	(6.21)
	Árbol completo	$W_{fc} = a_3 \cdot d^{b_3} \cdot R_{copa}^{c_3}$	(6.22)
Finos de la copa	Hasta una altura límite	$W_{hfc} = W_{fc} \cdot \left(1 - \exp \left(- \left(\frac{h_i'}{b_{31}} \right)^{c_{31}} \right) \right)$	(6.23)

donde W_i es la biomasa total del componente arbóreo i , en kg; W_{hi} es la biomasa hasta una altura límite de la fracción i , en kg. Cada componente i se corresponde con la nomenclatura recogida en el glosario; h es la altura total del árbol, en m; h_i' es la altura relativa límite, en m, empleada en el cálculo de la biomasa hasta una altura límite. Su valor empieza a partir de la base de la copa (h_{base} , en m) y termina en la altura total del árbol (h , en m) (ver Ecuación (6.2)); R_{copa} es el ratio de copa; y a_j , b_j y c_j son los parámetros a estimar ($j = 0, 1, 2$ y 3 , para el total de las i fracciones arbóreas; $j = 21$ y 23 para las fracciones de la copa estimadas hasta una altura límite).

En este sistema de ecuaciones (Tabla 6.8), los modelos definidos para madera y corteza, fueron ponderados con las variables independientes de d y h , de acuerdo con las expresiones recogidas en la Tabla 6.4. Asimismo, ambas fracciones del fuste fueron ponderadas con el número de datos utilizados. Por otro lado, considerando la corrección de la posible correlación entre las observaciones, las ecuaciones de

biomasa de la copa por alturas (ramas y finos) fueron ajustadas inicialmente sin expandir el término del error, y expandiendo dicho término posteriormente mediante un modelo autorregresivo de primer y segundo orden (AR(1) y AR(2), respectivamente) (Tabla 6.9). Finalmente fue utilizada una estructura AR(1), al presentar valores del estadístico de Durbin-Watson (DW) dentro de los intervalos de las tablas para rechazar la existencia de autocorrelación entre los residuos, para un valor de α de 0,05 (Durbin y Watson, 1951), por lo que no se consideró necesario realizar un modelo autorregresivo de orden superior.

Tabla 6.9. Valor del estadístico de Durbin-Watson (DW) en función del orden de la estructura autorregresiva empleada para modelizar el término del error de las ecuaciones de biomasa de ramas y finos de la copa de *Pinus pinaster* ajustadas simultáneamente.

Fracción	AR(0)	AR(1)	AR(2)
Ramas de la copa	1,41	1,93	1,96
Finos de la copa	1,11	1,86	1,97

donde AR(0) se corresponde con el ajuste sin estructura autoregresiva, y AR(1) y AR(2) son las estructuras autoregresivas de primer y segundo orden incluidas en el ajuste de los modelos seleccionados.

En la Tabla 6.10 se recogen los valores de los estadísticos de bondad de ajuste ($REMC$ y R^2_{adj}) para cada una de las ecuaciones ajustadas simultáneamente.

Tabla 6.10. Estadísticos de bondad de ajuste resultantes del ajuste simultáneo de las fracciones arbóreas del fuste y de la copa, para el árbol completo y hasta una altura límite, de *Pinus pinaster*.

Fracción	Porción del árbol	$REMC$	R^2_{adj}
Madera	Árbol completo	1,7963	0,9638
Corteza	Árbol completo	0,3953	0,9586
Ramas de copa	Árbol completo	0,8065	0,8398
	Hasta una altura límite	0,3453	0,9558
Finos de copa	Árbol completo	1,6228	0,6889
	Hasta una altura límite	0,5375	0,9468

donde $REMC$ es la raíz cuadrada del error medio cuadrático; y R^2_{adj} es el coeficiente de determinación ajustado.

En la Tabla 6.11 se muestran los parámetros estimados en el ajuste simultáneo, para las fracciones arbóreas del fuste (ajuste ponderado) y de la copa (ajuste sin ponderar) en el total del árbol, así como para los componentes de la copa hasta una altura límite (ajuste con estructura AR(1)).

Tabla 6.11. Parámetros estimados en el ajuste simultáneo de las ecuaciones de biomasa del fuste (ponderado) y de la copa (sin ponderar), para el árbol completo y por alturas, de *Pinus pinaster*.

Fracción	Porción del árbol	Parámetro	Estimación	Error estándar asintótico	t Valor	Prob> t
Madera	Árbol completo	a_0	0,033169	0,00426	7,79	<0,0001
		b_0	2,115141	0,08090	26,15	<0,0001
		c_0	0,503245	0,08060	6,24	<0,0001
Corteza	Árbol completo	a_1	0,025373	0,00212	11,98	<0,0001
		b_1	1,429734	0,06310	22,64	<0,0001
		c_1	0,731013	0,06220	11,75	<0,0001
Ramas de la copa	Árbol completo	a_2	0,006570	0,00190	3,45	0,0007
		b_2	2,770188	0,11190	24,76	<0,0001
		c_2	2,755435	0,22980	11,99	<0,0001
	Hasta una altura límite	b_{21}	0,535266	0,00975	54,88	<0,0001
		c_{21}	2,560498	0,10860	23,58	<0,0001
		Φ_{21}	-0,323780	0,06520	-4,97	<0,0001
Finos de la copa	Árbol completo	a_3	0,023572	0,00832	2,83	0,0053
		b_3	2,352110	0,13850	16,99	<0,0001
		c_3	1,473648	0,25940	5,68	<0,0001
	Hasta una altura límite	b_{31}	0,625903	0,00831	75,33	<0,0001
		c_{31}	3,259311	0,09230	35,30	<0,0001
		Φ_{31}	-0,44320	0,06060	-7,32	<0,0001

donde Prob>|t| es el valor de significación de cada parámetro estimado; a_j , b_j y c_j son los parámetros estimados para el árbol completo, para cada fracción arbórea i , y hasta una altura límite, para los componentes de la copa. Cada elemento arbóreo i se corresponde con la nomenclatura recogida en el glosario; Φ_i son los parámetros de correlación de la estructura autorregresiva AR(1), estimados para las fracciones de copa hasta una altura límite.

Los mejores ajustes para las ecuaciones del árbol completo se obtuvieron en las fracciones de madera, corteza y ramas de la copa. De forma comparativa, la fracción de finos de la copa mostró valores más bajos del coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}). Diversos trabajos apuntan al peor ajuste de las fracciones de copa, en comparación con las fracciones del fuste. Ejemplo de ello, para especies de coníferas, son los trabajos de Montero *et al.* (1999) para *Pinus pinaster*, Merino *et al.* (2003) para *Pinus radiata* y Balboa-Murias *et al.* (2006) para ambas especies. Este resultado, de acuerdo con Balboa-Murias *et al.* (2006), podría deberse a factores como la probabilidad de elección de las fracciones de la copa en el muestreo, la edad del arbolado, la especie o la distribución de los árboles en la masa. Zhang *et al.* (2004) añaden que la predicción de la biomasa de copa presenta una gran dificultad en comparación con la biomasa del fuste debido principalmente a la irregularidad en la distribución de sus componentes y a la mayor complejidad en su estructura. Por otra parte, Temesgen *et al.* (2010) especifican que las copas de

especies de coníferas pueden ser altamente variables tanto para el mismo árbol como para árboles diferentes, particularmente para la biomasa foliar y el área foliar. En este trabajo, los peores ajustes de la fracción de finos de la copa, en comparación con el resto de los componentes arbóreos estudiados, podrían relacionarse, entre otros, con factores como la variabilidad de los elementos finos a lo largo del árbol y la arquitectura de la copa dispersa e irregular que caracteriza a la especie objeto de estudio, resultando difícil encontrar una buena relación con variables dendrométricas como el diámetro normal.

El buen resultado obtenido para las ramas, en el árbol completo, ha sido mejor de lo esperado. En este caso, la poca representación de las fracciones más gruesas, al tratarse de árboles jóvenes, podría suponer la falta de una muestra lo suficientemente amplia para obtener una ecuación de esta fracción que cubra un mayor rango de variabilidad, lo que probablemente provocaría una reducción de la exactitud del modelo.

En la Tabla 6.12 se muestran las ecuaciones finales de biomasa ajustadas de forma simultánea para cada una de las fracciones arbóreas consideradas:

Tabla 6.12. Expresión de los modelos de biomasa ajustados de forma simultánea para las fracciones arbóreas del fuste y de la copa, para el árbol completo y hasta una altura límite, de *Pinus pinaster*.

Fracción	Porción del árbol	Modelo	
Madera	Árbol completo	$W_m = 0,033169 \cdot d^{2,115141} \cdot h^{0,503245}$	(6.24)
Corteza	Árbol completo	$W_c = 0,025373 \cdot d^{1,429734} \cdot h^{0,731013}$	(6.25)
	Árbol completo	$W_{rc} = 0,00657 \cdot d^{2,770188} \cdot R_{copa}^{2,755435}$	(6.26)
Ramas de la copa	Hasta una altura límite	$W_{hrc} = W_{rc} \cdot \left(1 - \exp \left(- \left(\frac{h_i'}{0,535266} \right)^{2,560498} \right) \right)$	(6.27)
	Árbol completo	$W_{fc} = 0,023572 \cdot d^{2,35211} \cdot R_{copa}^{1,473648}$	(6.28)
Finos de la copa	Hasta una altura límite	$W_{hfc} = W_{fc} \cdot \left(1 - \exp \left(- \left(\frac{h_i'}{0,625903} \right)^{3,259311} \right) \right)$	(6.29)

donde W_i es la biomasa total del componente arbóreo i , en kg; W_{hi} es la biomasa del árbol para una altura límite de la fracción i de la copa, en kg. La nomenclatura para cada componente i se corresponde con la recogida en el glosario; h es la altura total del árbol, en m; R_{copa} es el ratio de copa, entendido como la relación entre la longitud de copa y la altura total del árbol; y h_i' es la altura relativa límite, en m, utilizada en el cálculo de la biomasa hasta una altura límite para las fracciones de la copa. Su valor empieza a partir de la base de la copa (h_{base} , en m) y termina en la altura total del árbol (h , en m) (ver Ecuación (6.2)).

En la Figura 6.9 se recogen los gráficos que representan los valores predichos por los modelos de biomasa, ajustados simultáneamente, frente a los valores de biomasa

reales (valores observados), para las fracciones del fuste (madera y corteza) y de la copa (ramas y finos) del árbol completo y por alturas.

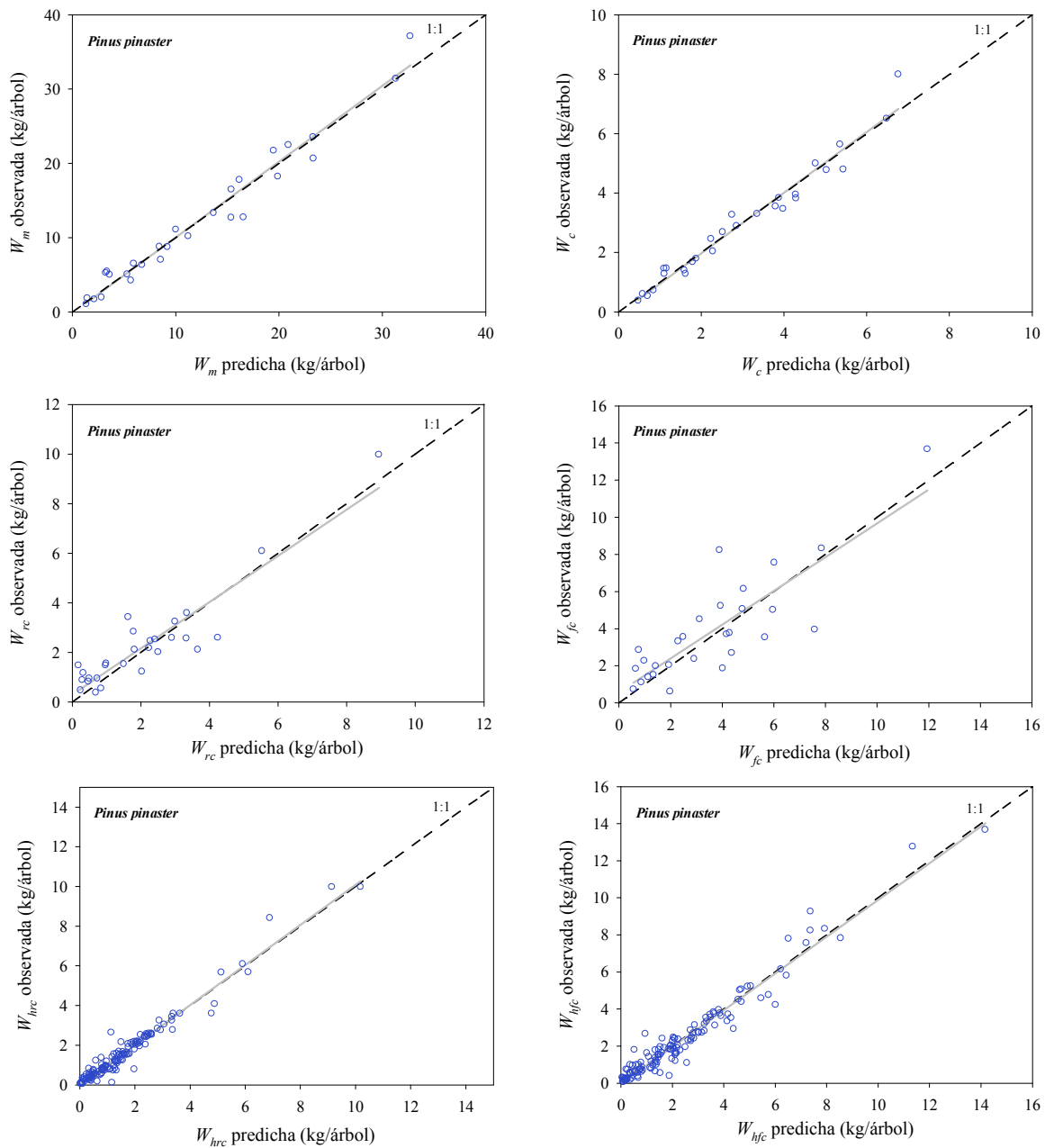


Figura 6.9. Representación gráfica de los valores de peso seco (kg/árbol) predichos frente a observados, obtenidos en el ajuste simultáneo de los modelos de biomasa de *Pinus pinaster* para las fracciones arbóreas de madera (1ª fila, izquierda), corteza (1ª fila, derecha), ramas de la copa (2ª fila, izquierda) y finos de la copa (2ª fila, derecha) para el árbol completo; y fracciones de ramas de la copa (3ª fila, izquierda) y finos de la copa (3ª fila, derecha) hasta una altura límite.

Como se puede observar en los gráficos anteriores, las fracciones del fuste (madera y corteza) se adaptaron mejor a la recta 1:1 representada, en comparación con las fracciones de la copa (ramas y finos de la copa), para el ajuste de la biomasa del árbol completo. De todas ellas, la fracción de finos de la copa volvió a mostrar la menor capacidad de ajuste. Por otro lado, las fracciones de la copa ajustadas hasta

una altura límite se adaptaron mucho mejor a dicha recta que en el caso del árbol completo en esas mismas fracciones. Idénticos resultados fueron observados en algunos trabajos como los de Porté *et al.* (2002) para *Pinus pinaster* subesp. atlántica, o el de Gillespie *et al.* (1994) para *Pinus taeda* L., donde se establecieron relaciones de la biomasa de ramas y acículas trabajando de forma individual a escala de rama y no para el conjunto del árbol o de la copa. Además en estos estudios se comprobó que el tamaño de la rama permitía explicar de una forma fiable la biomasa contenida en la misma, especialmente cuando se trataba del diámetro de inserción de la rama. Este tipo de relación, fue comprobado para la muestra de datos empleada en el presente trabajo, según la cual la biomasa de ramas y acículas se incrementa para las ramas de mayor grosor y viceversa. En la representación gráfica de dicha relación (Figura 6.10) fueron diferenciadas, además, las ramas vivas y muertas, estando estas últimas distribuidas en su mayoría en las zonas basales de la copa.

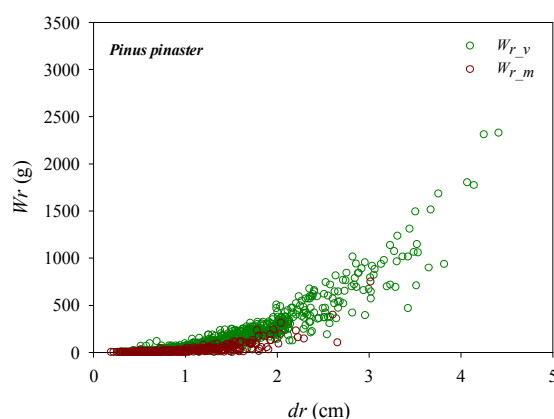


Figura 6.10. Representación gráfica del peso seco (g/árbol) de las ramas (W_r , g), vivas (W_{r_v} , g) y muertas (W_{r_m} , g), incluyendo el peso seco de acículas, frente al diámetro de las ramas en su inserción (dr , cm), en la muestra de 28 árboles de *Pinus pinaster* estudiada.

En la figura anterior se puede observar que la fracción muerta se concentra en ramas de diámetro en su inserción inferior a dos centímetros. En el análisis de las ramas vivas, la aportación en biomasa aumenta potencialmente con el diámetro en la inserción, aunque la aportación de ramas superior a 3 cm es minoritaria. Este aspecto es importante, ya que tal y como se estableció en el capítulo 3, éste es el diámetro máximo de rama a podar recomendado para facilitar la cicatrización. Por tanto la eliminación de ambos tipos de ramas (vivas y muertas) va a suponer una eliminación de biomasa de ramas y finos, con implicaciones de gran importancia desde el punto de vista nutricional y de protección de la masa frente al fuego, especialmente en las ramas muertas, dada la menor cantidad de nutrientes contenida en este tipo de material (por la falta de acículas), y el mayor riesgo de incendio generado por el mismo. En cualquier caso, resulta difícil realizar una generalización sobre el porcentaje y evolución del tipo de ramas que presenta una especie concreta, dada la influencia de otros factores sobre la ramosidad del mismo, como las características

del material genético (p.e. Grace *et al.*, 1998; 1999; Romano, 2002) y la gestión selvícola de la masa (Romano, 2002).

Atendiendo a los resultados obtenidos tras el ajuste de las ecuaciones de biomasa definidas en el presente trabajo, para el árbol completo (fracciones del fuste y de la copa) y hasta una altura límite (biomasa de la copa), la metodología empleada para dicho ajuste mostró ser adecuada para la estimación de la biomasa arbórea de masas regulares de *Pinus pinaster* en Asturias. Unido a esto, y dada la ausencia de ecuaciones de biomasa para árboles jóvenes de esta conífera, procedentes de masas regulares del noroeste peninsular, así como la falta de modelos que permitan determinar la biomasa para una porción concreta del árbol, las ecuaciones aquí presentadas pretenden ser un antecedente para desarrollar este tipo de modelos en trabajos futuros, pudiendo aportar una mayor información al gestor forestal acerca de la gestión de la biomasa relacionada con la gestión selvícola de podas y claras. De esta manera, las ecuaciones definidas para el árbol completo podrían ser herramientas de gran utilidad para la estimación de la biomasa total existente en masas jóvenes regulares de esta especie, en las que no se haya realizado ningún tipo de gestión, o para aquellas en las que se vaya a realizar una selvicultura de primeras claras o clareos. Por otra parte, las ecuaciones que permiten determinar la biomasa hasta una altura determinada podrían ser útiles para los gestores forestales como herramientas de predicción de la biomasa existente en una porción concreta del árbol, siendo la estimación de la biomasa de copa extraída en una actividad de poda la aplicación práctica más inmediata de estas ecuaciones, dada la edad y el tamaño de los árboles empleados para su determinación. Por tanto, ambos tipos de ecuaciones podrían ser utilizados para la estimación de la biomasa remanente, así como para la determinación de la biomasa generada en ambas intervenciones selvícolas, aportando así una mayor potencialidad a este tipo de funciones, al permitir determinar el impacto que la gestión de la biomasa y de los restos generados puede causar sobre la sostenibilidad del sistema forestal, hecho que adquiere mayor relevancia para las masas gestionadas bajo una selvicultura intensiva.

Por otro lado, y aunque se puede destacar que las ecuaciones aquí presentadas cubren la necesidad de estimar con mayor precisión la biomasa existente en las masas jóvenes regulares de *Pinus pinaster* del ámbito atlántico, sigue siendo necesario realizar un mayor esfuerzo de muestreo y procesado para la obtención de una mayor base de datos, que permita cubrir una mayor variabilidad en las masas estudiadas. En este sentido, uno de los trabajos que podría tener mayor interés a corto plazo podría ser el ajuste de nuevas ecuaciones que traten de incluir tanto masas jóvenes como adultas. Quizá, en ese caso, una ventaja podría ser la inclusión de la edad como variable explicativa del modelo, al igual que Porté *et al.* (2002) para

esta misma especie, dando lugar a una ecuación con un comportamiento mucho más dinámico.

Otro de los aspectos a considerar para el ajuste de este tipo de ecuaciones a medio plazo sería la inclusión del efecto de la selvicultura aplicada sobre la producción y reparto de la biomasa arbórea. Este estudio adicional permitiría la obtención de ecuaciones dinámicas, en las que se podría estimar con mayor precisión la influencia de la gestión selvícola en el crecimiento y distribución de la biomasa forestal de esta especie.

Además de la intensidad del tratamiento, según Muñoz *et al.* (2008), otro factor determinante en el efecto de la poda sobre el desarrollo del árbol y la producción de biomasa es el momento de la intervención. Así, y tal y como comentan Pinkard *et al.* (2004), la poda de ramas muertas o secas tendrá un menor efecto sobre el árbol. Esto podría explicar también el hecho de que la poda realizada en el trabajo de Muñoz *et al.* (2008) no mostrara una influencia significativa en el crecimiento y producción de biomasa, ya que la poda realizada en dicho estudio había sido tardía, eliminando una gran proporción de ramas de este tipo.

Unido a todo esto, existen otros factores asociados a la biomasa arbórea existente en un sistema forestal cuya caracterización presenta mayor dificultad, como puede ser el constante cambio de las condiciones climáticas o el origen del material genético de la especie. En el primer caso, los cambios producidos en las condiciones climáticas a escala global, con mayor peso en los últimos años, suponen un factor de dificultad añadida a la caracterización correcta de la biomasa forestal (Grote, 2002), motivo por el cual resulta cada vez más frecuente la inclusión de factores ambientales en la modelización forestal. El segundo caso aporta también una mayor complejidad en la estimación de la biomasa arbórea de *Pinus pinaster*, dada la existencia de masas de origen natural dentro de su rango de distribución, unido a la realización de plantaciones forestales con semillas de diferente origen y categoría genética de materiales forestales de reproducción llegando a ser incluso, en ocasiones, desconocido. En suma, autores como Chave *et al.* (2001), recomiendan la caracterización de la biomasa arbórea considerando la variabilidad existente desde los puntos de vista espacial y temporal. Todo ello complica aun más el desarrollo de modelos de estimación de la biomasa de la especie para un rango amplio de situaciones y características de la masa. Sin embargo, en el caso concreto de Asturias, se podrá realizar un abordaje con mayores garantías, ya que al menos en los montes públicos o conveniados, existe una perfecta trazabilidad del origen de la semilla empleada en todas las plantaciones realizadas por la Consejería de Agroganadería y Recursos Autóctonos. Sumado a todo lo anterior, y tal y como apuntan Alonso *et al.* (2005) para *Pinus pinaster*, el origen de la masa (natural o artificial) puede ser otro factor más de variabilidad en la distribución de la biomasa

de la especie. Esta apreciación podría explicar, en cierta manera, las diferencias observadas al aplicar las ecuaciones definidas al resto de los ensayos, donde una de las parcelas es de origen artificial (monte de Barcia) y el resto son de origen natural (montes de Valsera, Monteagudo y Uría).

Con todo lo anterior, queda clara la necesidad de trabajar con un mayor rango de datos y tipos de masa que permitan explicar en mayor medida los diferentes factores de variabilidad comentados. En cualquier caso, y asumiendo la existencia de un conjunto de aspectos que afectan a la producción de la biomasa arbórea, las ecuaciones definidas en este trabajo se han considerado adecuadas para la estimación de la biomasa forestal existente en masas jóvenes regulares de *Pinus pinaster* en Asturias. Por último, es importante recordar que las ecuaciones aquí presentadas deberán ser empleadas tan solo en masas cuyas características (especie, origen de la masa, rango diamétrico, edad) sean similares a las empleadas para su determinación.

6.3.2. Caracterización de la distribución real de la biomasa arbórea aérea y de su contenido de nutrientes

En un análisis conjunto de la biomasa del árbol, diferenciando fuste y copa, los elementos del fuste aportaron la mayor cantidad de biomasa, con un promedio del 68% del peso arbóreo, frente al 32% correspondiente con los elementos de la copa. Los resultados obtenidos por Balboa (2005), para masas adultas de esta misma especie en condiciones atlánticas (Galicia), mostraron que la biomasa del fuste y de la copa representaban el 79,2% y el 20,8% de la biomasa total respectivamente. La mayor proporción de biomasa del fuste y menor proporción de biomasa de la copa observada por Balboa (2005), en comparación con el trabajo aquí presentado, podría explicarse, a grandes rasgos, por la diferencia de edad de las masas. Esta puntualización sería además acorde con los resultados obtenidos por Montero *et al.* (1999) para *Pinus pinaster* subesp. mediterránea, quienes mostraron que la biomasa del fuste representaba valores que oscilaban entre el 62% y 79% de la biomasa total, y la biomasa de la copa valores entre el 38% y 21%, para árboles jóvenes y adultos, respectivamente. Autores como Bonomelli y Suárez (1999), Aparicio (2001) y Saavedra (2005) afirman que a medida que se desarrolla el árbol, la distribución porcentual de los diferentes componentes de la biomasa aérea presenta un cambio natural con la edad, aumentando la proporción de madera mientras que la corteza después de algunos años se mantiene constante. Las condiciones ecológicas del sitio son también determinantes del crecimiento y desarrollo de esta especie, y, por lo tanto, de la producción y distribución de su biomasa. Prueba de ello serían las diferencias observadas entre los trabajos de Balboa (2005) y Porté *et al.* (2002) para *Pinus pinaster* subesp. atlántica en el noroeste de España y suroeste de Francia,

respectivamente. Otros factores como las propias características del material vegetal de partida o la gestión selvícola de la masa, han sido destacados por Balboa (2005) como posibles aspectos que pueden influir en el reparto de la biomasa arbórea de esta especie. Asimismo, el tamaño del árbol ha mostrado ser un factor asociado a la distribución de la biomasa, lo que a su vez se encuentra directamente relacionado con los factores comentados (material vegetal, características del sitio, edad, gestión selvícola). Ejemplo de esto serían los trabajos de Montero *et al.* (1999) o Balboa (2005) para *Pinus pinaster*, Pérez-Cruzado y Rodríguez-Soalleiro (2011) para *Eucalyptus nitens* o Wang *et al.* (2011) para *Abies nephrolepsis* (Maxim), en donde las proporciones de biomasa del fuste y de la copa mostraron ser diferentes en función del tamaño del árbol. Otros trabajos como el de Muñoz-Riveros *et al.* (2005), para masas adultas de *Pinus radiata* en Chile, destacan también la importancia de la clase sociológica del árbol. Así, en dicho trabajo, se observó que la cantidad de biomasa de los árboles dominantes era hasta 1,5 veces la biomasa de los árboles codominantes y hasta 3,3 veces la de los árboles intermedios.

De todas las fracciones arbóreas, consideradas por separado, la madera mostró ser el componente con mayor representación en el árbol, siendo las ramillas más finas (0-0,3 cm) los elementos arbóreos menos representados. Dada la gran proporción de madera en el árbol, y tal y como mostraron recientemente Pérez-Cruzado y Rodríguez-Soalleiro (2011), la precisión en su estimación adquiere especial importancia. Por otro lado, la escasa representación de las ramillas de hasta 0,3 cm de diámetro puede deberse, en parte, al poco peso de estos elementos finos en comparación con el resto de los componentes arbóreos. En cualquier caso, desde un punto de vista teórico, la estimación de este tipo de ramillas finas resulta de gran interés por su relación directa con el balance nutricional del sistema forestal o el riesgo de inicio y propagación de un incendio forestal. Sin embargo, desde un punto de vista práctico, la dificultad que conlleva su estimación ha generado que su determinación sea poco frecuente.

La secuencia de acumulación de biomasa para el conjunto de fracciones de la parte aérea del árbol, diferenciadas durante el proceso de muestreo y procesado fue la siguiente: madera (53,7%) > acículas (16,1%) > corteza (14,3%) > ramas finas de 0,6-2 cm (10,1%) > ramillas de 0,3-0,6 cm (3,9%) > ramas gruesas de 2-7 cm (1,4%) > ramillas hasta 0,3 cm (0,3%). Atendiendo a estos valores, y analizando cada fracción por separado, para el total del fuste y de la copa así como para la distribución por alturas de la biomasa de copa, se presentan a continuación las proporciones de cada uno de ellos, y su comparativa con otros trabajos desarrollados para esta misma especie, atendiendo principalmente a las diferencias debidas a la procedencia, tamaño del árbol y/o edad de la masa.

6.3.2.1. Distribución y acumulación de la biomasa del fuste para el árbol completo

La proporción de biomasa del fuste (promedio del 68,0% del total), diferenciada a su vez en madera (promedio del 53,7% del total) y corteza (promedio del 14,3% del total), fue representada para cada árbol muestreado frente al diámetro normal (Figura 6.11). Tal y como se puede observar en la Figura 6.11, la cantidad de madera, y del conjunto del fuste, presentes en la parte aérea del árbol, mostraron una tendencia creciente, con una mayor proporción de ambas fracciones para los árboles de mayor diámetro. La corteza, sin embargo, tuvo un comportamiento relativamente homogéneo para los distintos árboles muestreados. De acuerdo con el trabajo de Montero *et al.* (1999), para *Pinus pinaster* subesp. mediterránea, sería esperable un menor reparto de biomasa del fuste en las primeras clases diamétricas, pasando a porcentajes que se mantienen casi constantes en las clases diamétricas centrales (C.D. 15-30 cm) y una menor representación de esta fracción para las clases diamétricas superiores. Con esto, el porcentaje de biomasa en el fuste sería inferior para las clases diamétricas extremas (C.D. <15 cm y C.D. >30 cm).

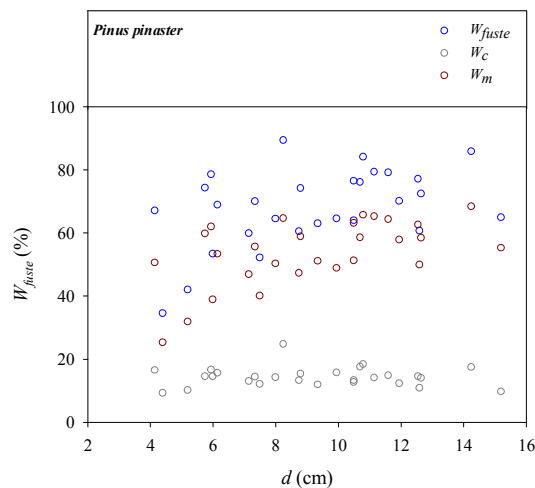


Figura 6.11. Proporción (%) de las fracciones de biomasa del fuste (W_{fuste}), madera (W_m) y corteza (W_c), sobre la biomasa aérea total del árbol de *Pinus pinaster*.

Además de la distribución de la biomasa en función del diámetro del árbol, se pueden encontrar en la bibliografía diversos trabajos que apuntan una tendencia clara del reparto de biomasa en las diferentes fracciones arbóreas con la edad. Así, tal y como recogen Porté *et al.* (2002), para masas de *Pinus pinaster* subesp. atlántica, y Montero *et al.* (1999), para *Pinus pinaster* subesp. mediterránea, la proporción de madera tiende a aumentar con la edad (en torno a un 25%). Sin embargo, mientras que en estos trabajos la cantidad de corteza observada, respecto al total del árbol, presentaba una tendencia relativamente decreciente, en el presente estudio, dicha fracción estuvo representada, por lo general, en una proporción bastante uniforme (variación de tan solo un 5% aproximadamente).

6.3.2.2. Distribución y acumulación de la biomasa de la copa para el árbol completo

La proporción de biomasa de la copa con respecto a la biomasa aérea total mostró una tendencia diferente para las fracciones de acículas, ramillas y ramas finas con respecto a las ramas gruesas. Así, tal y como se observa en la Figura 6.12, acículas (promedio del 16,1% del total), ramillas (promedio del 4,2% del total) y ramas finas (promedio del 10,1% del total) estuvieron más representadas en los árboles de menor diámetro, con una tendencia decreciente de la proporción de estos elementos finos en la copa para los árboles con diámetros de mayor grosor. Las ramas gruesas (promedio del 1,4% del total), por el contrario, mostraron estar más representadas en los árboles de mayor diámetro.

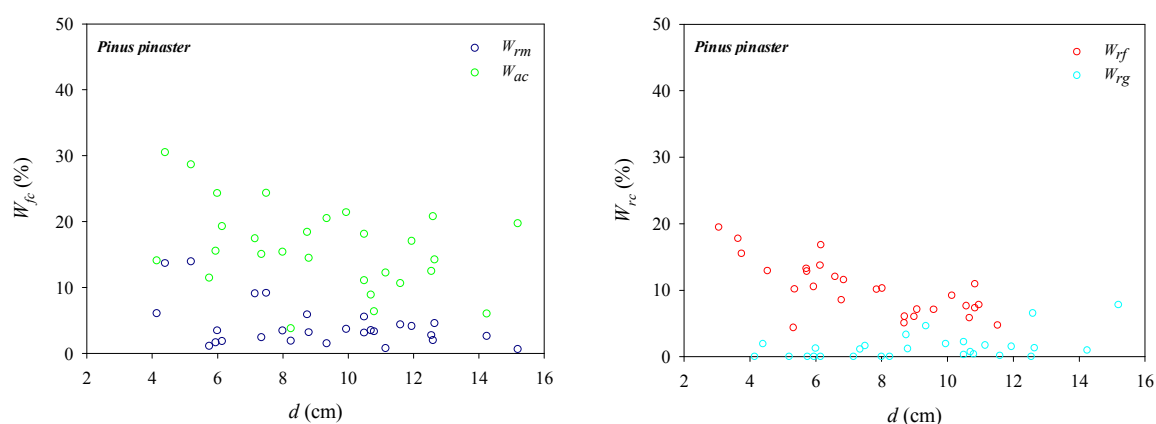


Figura 6.12. Proporción (%) de las fracciones de biomasa de la copa, diferenciada en finos de la copa (W_{rm} y W_{ac} , izquierda), y ramas de la copa (W_{rf} y W_{rg} , derecha), sobre la biomasa aérea total del árbol de *Pinus pinaster*.

Además de las diferencias existentes en la distribución de las fracciones de la copa, en función del tamaño del árbol, tal y como se comentó para la biomasa de fuste, la edad ha sido una de las variables más utilizada para el estudio del reparto de la biomasa de los diferentes componentes arbóreos. Así, en el estudio de Montero *et al.* (1999), la biomasa de copa de *Pinus pinaster* subesp. mediterránea mostró una menor proporción de ramas finas y una mayor cantidad de ramas gruesas para los árboles adultos en comparación con los árboles más jóvenes. Porté *et al.* (2002), para *Pinus pinaster* subesp. atlántica en Francia, consideraron toda la biomasa de ramas de forma conjunta, reportando un decrecimiento de la proporción de dicha biomasa con la edad. Estas observaciones comentadas para las fracciones de ramas de la copa podrían interpretarse coincidentes con los trabajos desarrollados para masas jóvenes y adultas de *Pinus pinaster* subesp. atlántica en el noroeste peninsular, de acuerdo con la muestra de árboles analizada en el presente estudio y el trabajo de Balboa (2005).

Para la fracción de acículas, Montero *et al.* (1999) no encontraron variaciones importantes con la edad para *Pinus pinaster* subesp. mediterránea, observando que la proporción de éstas se mantenía casi constante para las diferentes edades, con valores cercanos al 10%. Los resultados obtenidos para *Pinus pinaster* subesp. atlántica en el noroeste peninsular, comparando el presente estudio para masas jóvenes y el trabajo de Balboa (2005) para masas adultas, mostraron, sin embargo, ciertas diferencias para la biomasa foliar en función de la edad, siendo el valor promedio del 16,1% y del 5,0%, respectivamente.

Se debe recordar que las comparativas mostradas en este apartado para las diferentes edades y/o tamaños de los árboles, fueron realizadas sin considerar la influencia de otros factores asociados al reparto de la biomasa en el árbol como pueden ser las condiciones del sitio o la propia gestión de las masas.

6.3.2.3. Distribución y acumulación de la biomasa de la copa por alturas

La Figura 6.13 (izquierda) representa la distribución vertical real (correspondiente con la muestra de 28 árboles empleada en el presente trabajo) obtenida al ajustar la función de densidad de Weibull a la biomasa de las fracciones de copa, diferenciadas en: acículas (W_{ac}), ramillas (W_{rm}), ramas finas (W_{rf}) y ramas gruesas (W_{rg}). Asimismo se representa la distribución vertical de las fracciones de acículas, y del conjunto de ramas de la copa (ramillas, ramas finas y ramas gruesas), obtenidas del mismo modo, diferenciando los árboles por tamaños, en: pequeños ($d < 10$ cm) y medianos ($d \geq 10$ cm) (Figura 6.13, derecha). En ambos casos, la biomasa se encuentra distribuida en una altura relativa (0-1) que se extiende a lo largo de la longitud de copa (L_{copa}), desde la altura de la base de la misma (h_{base}) hasta el ápice del árbol (h).

Tal y como se esperaba, por su buen comportamiento en diversos trabajos realizados con anterioridad (Schreuder y Swank, 1974; Gary, 1978; Gillespie *et al.*, 1994, entre otros), y por los buenos resultados mostrados en la estimación de los modelos de biomasa de copa hasta una altura límite del presente trabajo, la función de densidad de Weibull logró caracterizar adecuadamente la distribución vertical real de las diferentes fracciones de la copa consideradas.

De acuerdo con la Figura 6.13 (izquierda), para el total de árboles que conforman la muestra del presente estudio, la mayor cantidad de ramillas (61%) se concentra en el 30-60% inferior de la copa, estando su valor máximo en la mitad de la longitud de copa (L_{copa}). La mayoría de las ramas finas (60%) se encuentran representadas a la misma altura que la fracción anterior, entre el 30% y el 60% inferior de la L_{copa} . Las ramas gruesas se distribuyen de forma muy similar, con prácticamente la mitad de su biomasa (53%) entre el 40% y 60% de la copa, estando su máximo en el 60% de su L_{copa} . La fracción de acículas mostró un patrón de distribución algo diferente,

estando ligeramente desplazado hacia la parte superior de la copa, con la mitad de su biomasa (51%) en el intervalo que va del 50% al 70% inferior de la L_{copa} , y un valor máximo a una altura del 60% de la L_{copa} .

La Figura 6.13 (derecha), diferenciando los árboles por su diámetro, en pequeños y medianos, muestra una distribución de acículas y ramas (conjunto de ramillas, ramas finas y ramas gruesas) con un patrón similar al observado en la Figura 6.13 (izquierda). En este caso (Figura 6.13, derecha), la mayor proporción de ramas se encuentra ubicada entre el 40% y 60% inferior de la L_{copa} , mientras que las acículas se presentan mayormente entre el 50% y 70% de la L_{copa} . Comparativamente, y como es lógico, la carga de combustible acumulada en la copa resultó menor para los árboles de menor tamaño.

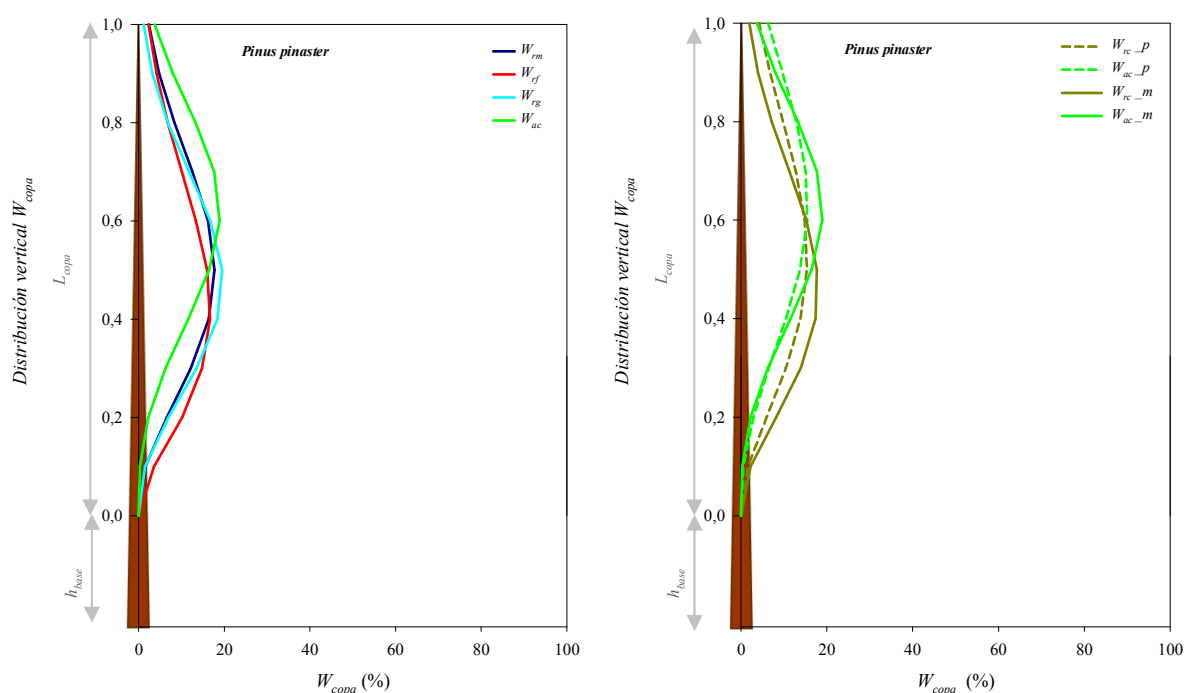


Figura 6.13. Distribución vertical real de la biomasa de copa de la muestra de 28 árboles de *Pinus pinaster* estudiada, para las fracciones de acículas (W_{ac}), ramillas (W_{rm}), ramas finas (W_{rf}) y ramas gruesas (W_{rg}), (izquierda); y para el conjunto de ramas de la copa (W_{rc}) y acículas (W_{ac}), diferenciando los árboles según su tamaño (pequeños ($d < 10$ cm) y medianos ($d \geq 10$ cm) (derecha).

En el presente trabajo, la distribución vertical de la fracción de acículas se encontró ligeramente desplazada hacia la parte superior del fuste. Este comportamiento podría deberse, en parte, a la competencia a la que se han enfrentado estos árboles durante su crecimiento, dada la alta tasa de regenerado presente en la mayoría de las masas regulares jóvenes de esta especie en la región. A esto se suma la propia competencia del estrato superficial, especialmente de helecho,

matorral frecuente en las masas estudiadas, cuya altura y densidad en los meses de verano supone una reducción considerable de la luz que penetra en el estrato inferior de la masa. Este planteamiento concuerda con lo observado por Gillespie *et al.* (1994), quienes analizaron la relación existente entre la posición de las ramas en el árbol y la biomasa foliar, obteniendo una relación negativa entre ambas variables, de manera que la mayor distancia desde el ápice del árbol suponía una reducción en la cantidad de acículas presente en una rama de un tamaño dado. Estos autores apuntan a que esta distribución vertical de la biomasa foliar, en donde la parte inferior de la copa presenta una menor proporción de acículas podría deberse a la mayor sombra producida en esa zona de la copa, especialmente cuando se trata de masas que no han sido intervenidas selvícolumente, mostrando el fuerte efecto de la luz y la intercepción de la misma por parte de las acículas. La competencia comentada y la falta de luz en el estrato superficial podría, por tanto, suponer la muerte y caída de las acículas situadas en la parte basal de la copa, llevando al secado y muerte posterior de estas ramas que deben ser eliminadas para evitar la aparición de nudos muertos.

Por otra parte, y aunque es ampliamente aceptado que la eliminación de ramas vivas en el árbol puede llegar a causar un efecto mayor sobre el crecimiento y desarrollo del mismo, dicho efecto puede no ser negativo si la intervención de poda se efectúa de forma adecuada, siguiendo las pautas recomendadas para este tipo de tratamiento (intensidades moderadas, manteniendo el equilibrio entre crecimiento y calidad de madera, e interviniendo tan solo en los árboles seleccionados por sus características para la producción de madera de calidad: alometría del árbol, tamaño y distribución de las ramas, rectitud del fuste, estado sanitario, calidad del sitio, etc.). Además de las podas, la gestión de la densidad de una masa forestal, mediante la realización de cortas intermedias (clareos y/o claras), podría evitar o ralentizar la muerte de las ramas y acículas situadas en la parte inferior de la copa, gracias a la reducción de la competencia entre individuos, lo que ayudaría a su vez a mejorar la calidad de la madera de los árboles que permanecen en pie, por la menor cantidad de nudos muertos. Por otro lado, el mayor espaciamiento generado en la masa aclarada ha mostrado favorecer el crecimiento diametral y el engrosamiento de las ramas de los árboles remanentes, siendo éste último aspecto poco deseable para la producción de madera de calidad. Al igual que lo comentado para las podas, las claras deben ser realizadas teniendo en cuenta una serie de requisitos de la masa y de los árboles que justifiquen su realización (competencia, fisionomía del árbol, estado sanitario, estabilidad de la masa, calidad del sitio etc.). En cualquier caso, es necesario realizar una selvicultura que combine los diferentes tratamientos selvícolas (podas y cortas intermedias) con el fin de optimizar la calidad del producto final, tratando de intervenir en el momento adecuado para cada caso concreto. Por todo lo comentado, es además esperable que la distribución vertical de la biomasa de la copa de los

árboles sometidos a una selvicultura de este tipo, se vea modificada por los tratamientos aplicados.

De acuerdo con todo lo anterior, la realización de actividades de poda en masas jóvenes regulares de *Pinus pinaster*, con intensidades de hasta el 40-50% de la L_{copa} , no supondrían una eliminación de biomasa de la copa que parezca comprometer *a priori* la proporción de las diferentes fracciones en el árbol, ni con ello el crecimiento y desarrollo de la masa. Podas más intensas, supondrían una eliminación más significativa de biomasa de ramas y acículas, siendo aun así la fracción de acículas la menos afectada. A esto se suma el hecho de que una parte importante de la copa basal se encuentra generalmente en estado seco o muerto, por lo que la eliminación de estas fracciones no supone un impacto negativo para el árbol, al tratarse de componentes arbóreos que ya no están aportándole una funcionalidad positiva al mismo. Por otra parte, y como ya se ha adelantado con anterioridad, la biomasa seca o muerta de ramas y acículas supone un menor aporte nutricional y un mayor riesgo de incendio si dicho material se mantiene sobre el terreno tras la realización de la poda. Por todo ello, parece recomendable realizar las podas de la parte inferior de la copa, para masas jóvenes regulares de *Pinus pinaster*, con intensidades inferiores al 40-50% de la L_{copa} , siempre y cuando se cumplan el resto de criterios establecidos para la aplicación correcta de los tratamientos, tanto para el propio árbol (tamaño, rectitud, estado sanitario, etc.) como para el conjunto de la masa (calidad del sitio, etc.), siendo preferible la eliminación de ramas en estado vivo.

Los valores aquí presentados para árboles jóvenes de masas regulares de *Pinus pinaster* subesp. atlántica tratan de mostrar la distribución vertical observada en la muestra analizada para un momento determinado en el tiempo. Sin embargo, tal y como se viene comentando a lo largo de este capítulo, la gran variabilidad existente en la distribución de la biomasa de las diferentes fracciones de la copa requiere de un estudio más profundo en el que se consideren los diversos factores que pueden afectar a dicha distribución, tales como la edad del árbol, la gestión selvícola o las propias condiciones de desarrollo de la masa. Un ejemplo de este tipo de estudios sería el de Gary (1978), quien trató de determinar el efecto de las claras en la distribución vertical de la biomasa de la copa de *Pinus contorta* Dougl., diferenciando acículas y ramas. En ese trabajo, también fue utilizada la función de densidad de Weibull. La distribución obtenida para la fracción de acículas en la masa aclarada tuvo una forma más o menos simétrica, bastante parecida a la forma de la distribución de una población normal, con cerca del 50% del peso de acículas repartido entre la mitad inferior y la mitad superior de la copa. Por el contrario, cerca del 75% del peso de las acículas de los árboles se encontraron situadas en zonas no aclaradas, se encontró situado en la mitad superior de la copa. Se debe considerar también que la distribución de la biomasa de la copa en masas adultas, como es el

caso del estudio de Gary (1978), puede resultar ligeramente diferente al de las masas jóvenes, como las estudiadas en el presente trabajo, en las que la distribución de la biomasa de la copa es, por lo general, mucho más homogénea. Otro de los trabajos destacables, en el que también ha sido analizada la distribución de la biomasa de copa considerando factores asociados con la gestión selvícola, ha sido el de Gillespie *et al.* (1994). Estos autores estudiaron el efecto de la realización de claras y la fertilización en la distribución de la biomasa foliar utilizando igualmente la función de Weibull. En ese trabajo, observaron una redistribución de dicha biomasa hacia la zona inferior de la copa, con una reducción relativa de la biomasa foliar cercana al ápice en las masas aclaradas y fertilizadas. De esta manera, Gillespie *et al.* (1994), confirmaron que los tratamientos de claras y de fertilización afectaban a la cantidad y distribución de la fracción de hojas, afectando a su vez, de acuerdo con Russell *et al.* (1989), a la propia asimilación de C de los árboles o a la productividad final de la masa.

De todos los componentes de la copa, y tal y como se ha podido confirmar con los ejemplos anteriores, la fracción de acículas ha sido y seguirá siendo uno de los elementos arbóreos de mayor interés. Este protagonismo de la biomasa foliar se debe, fundamentalmente, a la estrecha relación existente entre las acículas del árbol y los procesos de intercepción de luz, transpiración y fotosíntesis neta de la copa, adquiriendo por ello un papel fundamental en el crecimiento del árbol (Beadle *et al.*, 1995; Muñoz-Riveros *et al.* 2005) y en la productividad y dinámica de los rodales (Oliver y Larson, 1996) así como en la captación de C. Este protagonismo de las hojas o acículas ha llevado a la realización de diversos estudios que se han centrado únicamente en dicha fracción arbórea, como, por ejemplo, el trabajo de Porté *et al.* (2000; 2002) para *Pinus pinaster* subesp. atlántica en Francia o los trabajos de Battaglia y Sands (1997), Afif *et al.* (2009), o Álvarez-Álvarez *et al.* (2011), entre otros, para diversas especies de coníferas y frondosas. En los próximos inventarios a efectuar en las masas estudiadas en este trabajo, tras la instalación de la segunda fase del sistema experimental, se introducirá la evaluación del Índice de Área Foliar - *IAF* (Perry, 1994; Cherry *et al.*, 1998; Smethurst *et al.*, 2003) por ser un buen indicador de la capacidad de la copa para absorber la radiación fotosintéticamente activa (Perry, 1994), del efecto de las condiciones ambientales (Battaglia *et al.*, 1998; Amponsah *et al.*, 2005), de la edad (Jerez *et al.*, 2005), de la época del año (Simioni *et al.*, 2004) o de las propias características de la masa (Rodríguez, 2002). Por todos estos motivos, el *IAF* presenta un papel fundamental en herramientas de gestión más específicas, como los propios modelos de procesos, generando una información adicional en el seguimiento y predicción del crecimiento de una masa (Cherry *et al.*, 2002).

6.3.2.4. Balance nutricional de las fracciones de biomasa arbórea aérea

En las Tablas 6.13 y 6.15 se muestran las concentraciones de los principales macro y micronutrientes de las diferentes fracciones arbóreas analizadas en la submuestra de árboles seleccionada con este fin.

Tabla 6.13. Concentraciones de macronutrientes en las diferentes fracciones aéreas del árbol obtenidas a partir de la submuestra de *Pinus pinaster* analizada.

Fracción	N	P	K	Ca	Mg
Madera	1,9778	0,1333	0,9000	0,9111	0,3333
Corteza	3,6333	0,4444	2,5889	3,1000	0,6889
Ramas gruesas	2,3778	0,2000	1,2556	2,4000	0,5778
Ramas finas	3,0889	0,3222	1,6444	3,8222	0,6889
Ramillas	3,7889	0,5000	2,4222	3,6556	0,8556
Acículas	10,0986	0,3903	3,7250	2,9118	1,1792

donde N es la concentración de nitrógeno; P es la concentración de fósforo; K es la concentración de potasio; Ca es la concentración de calcio; y Mg es la concentración de magnesio, todas ellas expresadas en mg/g.

En vista de la Tabla 6.13, la madera presentó las menores concentraciones de todos los macronutrientes. Este resultado fue observado también por Rodríguez-Soalleiro *et al.* (2004) y Balboa (2005) para masas adultas de *Pinus pinaster* en Galicia, y por Merino *et al.* (2003) para masas jóvenes y adultas de *Pinus radiata* en esa misma región. Por otro lado, la corteza mostró valores importantes de los diferentes macronutrientes en comparación con otras fracciones arbóreas. Otros autores como Porté *et al.* (2002), destacaron también la contribución de la corteza en el balance nutricional. De acuerdo con esto, y asumiendo que las masas del presente estudio aun son jóvenes para su aprovechamiento final, se puede intuir que la extracción del fuste, incluyendo madera y corteza, supondría una retirada importante de nutrientes del sistema, cuyo impacto en la dinámica nutricional de la masa forestal incrementaría para el momento óptimo del aprovechamiento, en el que la biomasa y la cantidad de nutrientes asociada sería mucho mayor. Esta observación coincide con diversos estudios realizados para masas adultas con aprovechamiento comercial (p.e. Rey *et al.*, 2001; Balboa, 2005). Así, por ejemplo, Rey *et al.* (2001), para masas adultas de *Pinus radiata*, indicaron que la extracción de las fracciones de madera y corteza (78% del total de la biomasa), supuso la retirada de la mayor parte de los nutrientes P, Ca, Mg y K asimilados por la plantación.

Por otro lado, y de acuerdo con los resultados mostrados en la Tabla 6.13, los elementos de la copa acumularon una parte importante de los nutrientes asimilados por el árbol, destacando la fracción de acículas, que mostró una mayor reserva de

nutrientes, especialmente de N, K y Mg. Este resultado fue coincidente con otros trabajos realizados para la misma especie, como los estudios de Rodríguez-Soalleiro *et al.* (2004) y Balboa (2005), para *Pinus pinaster* subesp. atlántica, y de Montero *et al.* (1999) para *Pinus pinaster* subesp. mediterránea. De acuerdo con esto, y tal y como se ha venido comentando, se confirma el importante papel de las acículas en la acumulación de nutrientes. Esta misma observación fue apuntada con anterioridad en diversos trabajos desarrollados para diferentes tipos de masas y ámbitos geográficos (p.e. Lugo *et al.*, 1990; Fölster y Khanna, 1997; Ouro *et al.*, 2000; Merino *et al.*, 2003; Rodríguez-Soalleiro *et al.*, 2004). Por todo esto, es ampliamente aceptado que las acículas conforman una de las fracciones de mayor interés en la dinámica de nutrientes del sistema forestal, siendo por ello utilizado su valor nutricional como indicativo del contenido de nutrientes de la masa. Así, Bará (1991) y Bonneau (1995), trabajando con *Pinus pinaster* en el noroeste de España y suroeste de Francia, propusieron un rango de valores óptimos y críticos de los principales macronutrientes presentes en la fracción de acículas con el fin de evaluar el estado nutritivo de las masas de esta especie. Estos valores, recogidos en la Tabla 6.14, han sido ampliamente utilizados como referencia del estado nutricional de las masas de *Pinus pinaster* dentro de su ámbito de distribución natural (p.e. Saur *et al.*, 1992; Montero *et al.*, 1999; Balboa, 2005; Afif *et al.*, 2008; 2009; López-Varela *et al.*, 2008; Álvarez-Álvarez *et al.*, 2011).

Tabla 6.14. Niveles satisfactorios, marginales y críticos de los nutrientes foliares en *Pinus pinaster*, establecidos por Bará (1991) y Bonneau (1995) para el noroeste de España y suroeste de Francia.

Niveles nutrientes foliares	N	P	K	Ca	Mg
Niveles satisfactorios	12,0-15,0	1,2-1,5	> 5,0	1,0-1,2	> 1,0
Niveles marginales	10,0-12,0	0,8-1,0	3,0-5,0	1,0	0,7-1,0
Niveles críticos	< 10,0	< 0,8	< 3,0	< 0,6	< 0,7

donde N es la concentración de nitrógeno; P es la concentración de fósforo; K es la concentración de potasio; Ca es la concentración de calcio; y Mg es la concentración de magnesio, todas ellas expresadas en mg/g.

De acuerdo con los valores propuestos por Bará (1991) y Bonneau (1995), recogidos en la tabla anterior, los niveles de N, P y K obtenidos en la submuestra de acículas analizada en el presente trabajo resultaron deficientes, con valores situados dentro del nivel considerado como marginal para N y K, y crítico para P. Trabajos como el de Álvarez-Álvarez *et al.* (2011), para esta misma especie en la provincia de Asturias, mostraron deficiencias de estos mismos elementos, a excepción del N, para el que obtuvieron valores superiores a los descritos como satisfactorios, encontrando también deficiencias para Mg. En dicho estudio, además, los elementos que resultaron deficientes (P, K y Mg) presentaron valores inferiores a los planteados como niveles marginales. Otros autores como López-Varela *et al.* (2008)

encontraron resultados similares para los elementos P, K y Mg en masas jóvenes de *Pinus pinaster* de Galicia. En esa misma región, Balboa (2005) y Merino *et al.* (2003) observaron únicamente deficiencia foliar en P para *Pinus pinaster* y *Pinus radiata*, respectivamente. De la misma manera, en el presente estudio, tan solo se obtuvieron valores inferiores a los marginales para el P. Estas deficiencias en P fueron encontradas además para los diferentes componentes arbóreos en diversos estudios desarrollados en el ámbito atlántico. Ejemplo de ello son los trabajos de Merino y Edeso (1999), Ouro *et al.* (2000), Zas *et al.* (2000) o Sánchez Rodríguez *et al.* (2002), para masas de *Pinus radiata*, así como los estudios de Rodríguez-Soalleiro *et al.* (2004) o Balboa (2005), para *Pinus pinaster*. Atendiendo a la bibliografía, ha sido reportado que niveles bajos de P, Ca y/o Mg pueden limitar el crecimiento de masas jóvenes (Merino y Edeso, 1999; Zas *et al.* 2000) y adultas (Romanyá y Vallejo, 1996) de *Pinus radiata*, siendo esperable un papel semejante de estos nutrientes en el crecimiento de *Pinus pinaster*. Así, por ejemplo, Álvarez-Álvarez *et al.* (2011), trabajando con *Pinus pinaster* subesp. atlántica en Asturias, confirman que la concentración de P presenta cierta relación con el crecimiento en altura de los árboles, lo que tiene sentido dada la importancia de dicho nutriente en las plantas. Esta observación ha sido afirmada también por Dumbrell y McGrath (2002), quienes obtuvieron una fuerte relación entre el crecimiento y el contenido de P de la fracción de acículas de esta especie, indicando que el P es el principal nutriente limitante del crecimiento de *Pinus pinaster*. En ese mismo trabajo, se muestra una interacción negativa entre N y P, de forma que la aplicación conjunta de ambos elementos en una fertilización del suelo puede reducir la concentración de P y consecuentemente provocar un menor crecimiento en altura que, en ocasiones, puede llegar a ser significativo. Por otra parte, trabajos como el de Afif *et al.* (2009) destacan la importante relación encontrada entre el contenido de P de la fracción foliar y el índice de sitio, poniendo de manifiesto la importancia de la fertilización fosfórica o la aplicación de técnicas selvícolas o laboreo que favorezcan la mineralización de la materia orgánica. Otros trabajos como el de López-Varela *et al.* (2008) observaron una buena relación entre el contenido de K de la fracción foliar y el índice de sitio, y destacan la importancia de la nutrición en K para el crecimiento de plantaciones de *Pinus pinaster*, recomendando también la fertilización como solución a las deficiencias de este nutriente. Por tanto, parece clara la necesidad de cuantificar el contenido nutricional de una masa forestal, de cara a determinar las medidas necesarias para alcanzar una producción óptima (Afif *et al.*, 2009) y una gestión sostenible del recurso (Merino *et al.*, 2003; Afif *et al.*, 2009), pudiendo determinar, en su caso, la necesidad de llevar a cabo la reposición de ciertos nutrientes esenciales para el sistema forestal ante contenidos bajos de los mismos, aspecto que además se encuentra contemplado en los programas de certificación de gestión forestal sostenible. Esto resulta aún más importante para las masas

gestionadas bajo una selvicultura intensiva, dada la mayor cantidad de nutrientes extraída en las diferentes intervenciones realizadas, y que en ocasiones son incluso sacados del sistema forestal, pudiendo llegar a reducir de forma significativa el contenido de nutrientes de dicho sistema, afectando especialmente a la fertilidad de los suelos, que a su vez repercutirá, a medio-largo plazo, en el estado nutricional y crecimiento de los árboles que permanecen en pie (Merino y Edeso, 1999) así como a la propia productividad de la masa.

Por otro lado, tal y como se puede observar en la Tabla 6.15, los valores de los micronutrientes, para cada una de las fracciones arbóreas consideradas, mostraron tendencias diferentes a las observadas para los macronutrientes. En este caso, la cantidad de nutrientes acumulada en las acículas no supuso una proporción tan importante como en el caso de los macronutrientes. Tan solo destacaron en los elementos foliares los registros de Mn y B. Saur *et al.* (1992) también observaron mayores concentraciones de Mn en las acículas para masas jóvenes de *Pinus pinaster*, no así para el B. Los niveles de Mn y Zn observados en el presente trabajo fueron bastante inferiores a los obtenidos por López-Varela *et al.* (2008) para masas jóvenes de *Pinus pinaster* situadas sobre terrenos agrícolas abandonados, en los que previsiblemente se llevaron a cabo diferentes niveles de fertilización durante el aprovechamiento agrícola de los mismos, pudiendo ser el motivo de una mayor concentración de nutrientes en el suelo y en la vegetación establecida. Sin embargo, los niveles de B y Fe presentes en la fracción de acículas fueron muy similares para el trabajo de López-Varela *et al.* (2008) y el presente estudio. Por otro parte, considerando la biomasa que se encuentra distribuida en la copa y la biomasa del fuste, más de la mitad de los micronutrientes totales del árbol se encontraron distribuidos en la copa, resultado coincidente con el estudio de Saur *et al.* (1992).

Tabla 6.15. Concentraciones de micronutrientes en las diferentes fracciones aéreas del árbol obtenidas a partir de la submuestra de *Pinus pinaster* analizada.

Fracción	Fe	Mn	Zn	Cu	B
Madera	0,0378	0,0257	0,0109	0,0093	0,0070
Corteza	0,0764	0,0458	0,0272	0,0096	0,0166
Ramas gruesas	0,0462	0,0387	0,0269	0,0093	0,0099
Ramas finas	0,0658	0,0462	0,0428	0,0077	0,0118
Ramillas	0,0847	0,0472	0,0536	0,0092	0,0157
Acículas	0,0743	0,0876	0,0519	0,0037	0,0243

donde Fe es la concentración de hierro; Mn es la concentración de manganeso; Zn es la concentración de zinc; Cu es la concentración de cobre; y B es la concentración de boro, todas ellas expresadas en mg/g.

Por lo general, los valores de los nutrientes aquí presentados fueron inferiores a los mostrados en los estudios realizados para masas adultas de esta misma especie en el ámbito atlántico (Rodríguez-Soalleiro *et al.*, 2004; Balboa, 2005). Las diferencias entre masas jóvenes, como las aquí estudiadas o las empleadas en los trabajos de López-Varela *et al.* (2008) o Zas y Serrada (2003), y masas adultas, como las utilizadas en los trabajos de Rodríguez-Soalleiro *et al.* (2004) y Balboa (2005) eran esperables, dados los cambios que pueden producirse en el contenido de nutrientes y en parámetros asociados, como la edad, la gestión selvícola, las condiciones ambientales y del sitio, y la diferente eficiencia en el uso de nutrientes durante el crecimiento de una plantación. Autores como Gerding y Schlatter (1995), o Bonomelli y Suárez (1999), afirman que el balance nutricional del sitio depende sobre todo de la interacción de la especie con factores asociados al suelo, el clima y la gestión selvícola. De todos ellos, tan sólo es posible modificar el tipo de gestión realizado en una masa forestal, por lo que será de gran importancia el conocimiento del efecto que dicha gestión tendrá sobre los nutrientes del sistema, especialmente para la gestión de los restos generados. En este sentido, es importante diferenciar la clase de gestión efectuada sobre dichos restos, así como el tipo de biomasa residual, dado el diferente impacto producido sobre el sistema. Uno de los aspectos más utilizados para diferenciar el tipo de biomasa residual es el tamaño de las fracciones, diferenciando generalmente el material fino y grueso, o incluso de tamaño medio. En general, la biomasa fina (ramas finas, ramillas y acículas), generada constantemente por las intervenciones selvícolas realizadas (p.e. podas y claras), o por la propia caída de las hojas (desfronde), se mantiene habitualmente en el monte. Por contra, la biomasa más gruesa (relacionada con el fuste del árbol), generada en las cortas intermedias (clareos y claras) y cortas finales, es extraída del monte con mayor frecuencia, para su utilización en la industria de transformación de la madera e incluso, en ocasiones, para su uso energético. Sin embargo, en otros casos, la biomasa residual de los tratamientos selvícolas, tanto fina como gruesa, es abandonada en el monte. En esta situación, relativamente frecuente en el noroeste peninsular, tal y como indican Montero *et al.* (1999), los restos selvícolas acabarán por incorporarse nuevamente al suelo, suponiendo hasta ese momento un elevado riesgo de incendio, además de comprometer el estado sanitario del arbolado y obstruir, en muchos casos, la accesibilidad al interior de la masa. Otra de las opciones adoptadas en esta zona del territorio es la quema de los restos, que además de ser un foco de peligro de incendio si no se lleva a cabo un control adecuado, va a suponer la pérdida de parte del C y de los nutrientes contenidos en dicha biomasa residual, principalmente debido a la volatilización de éstos. Por otra parte, existe la posibilidad de extraer los restos fuera de la masa intervenida, mitigando los problemas antes referidos (riesgo de incendio, riesgo sanitario, accesibilidad), pero esta opción implica a su vez una retirada importante del C y los nutrientes presentes

en dichos restos. Esta pérdida de nutrientes generada por la extracción de los restos del sistema, o bien por la ocurrencia de un incendio forestal, puede poner en peligro la productividad del sitio, lo que resulta de mayor importancia, tal y como indican Graham *et al.* (1999) para los lugares de menor fertilidad. Por último, siempre que los costes de la operación puedan ser asumidos por el gestor, la trituración y distribución de los restos en el monte serían las prácticas más recomendables para el tratamiento de la biomasa residual, facilitando su descomposición e incorporación al suelo y reduciendo los posibles riesgos bióticos y abióticos de la masa. Este tipo de actuación adquiere mayor importancia para las masas forestales gestionadas bajo una selvicultura intensiva (mayor cantidad de biomasa residual generada) y en aquellos montes que presenten suelos pobres en nutrientes. En relación con este último punto, diversos autores, como Moore (1994), recomiendan el abandono de los elementos finos distribuidos en el terreno, durante incluso un invierno, para un mayor aporte nutricional al sistema forestal (especialmente N, K y S). Por tanto, y de acuerdo con la recomendación de Balboa (2005), apuntada ya en la parte introductoria de este trabajo, se debe tratar de realizar un aprovechamiento sostenible de la biomasa arbórea, mediante una gestión selvícola que asegure la conservación de la capacidad productiva de los suelos, reduciendo los costes nutricionales del aprovechamiento forestal.

Además de todo lo anterior, un correcto estudio del contenido nutricional de una masa forestal debe considerar a su vez los nutrientes presentes en el estrato superficial y en el suelo. Desde el punto de vista nutricional, éste último adquiere aun más importancia ya que en muchas ocasiones la escasez de ciertos elementos en el árbol puede deberse a los bajos niveles existentes en el suelo (Sánchez-Rodríguez *et al.*, 2002) y, por tanto, al limitado suministro de esos nutrientes por parte del suelo (Merino *et al.*, 2003). Aunque es cierto que factores como el propio lavado de los elementos del suelo como consecuencia de la precipitación, o la alteración de los minerales geológicos del suelo, juegan un papel importante en la reserva de los elementos en el suelo, la propia gestión selvícola de la masa y, sobre todo, la gestión de los restos generados en las diferentes intervenciones selvícolas, han mostrado ser también factores de peso en la estabilidad nutricional del sistema forestal. Dentro de las diferentes propiedades de los suelos, Álvarez-Álvarez *et al.* (2011) indicaron recientemente que el factor más limitante para la productividad de las masas de *Pinus pinaster* en Asturias es la profundidad del mismo, siendo el nivel de Mg y la materia orgánica los elementos nutricionales del suelo que mostraron una mayor relación con el índice de sitio. En cualquier caso, autores como Covelo y Delgado (2008) recomiendan considerar también la distribución espacial de los nutrientes, destacando la diferente estructura espacial mostrada por el N y el P en una masa de *Pinus pinaster* de Galicia.

A pesar de no contar con una amplia muestra de árboles para el análisis de nutrientes efectuado en este estudio, se ha tratado de mostrar unos valores indicativos de los niveles nutricionales de los principales macro y micronutrientes presentes en las masas regulares de *Pinus pinaster* empleadas en el presente trabajo. En cualquier caso, resultará de interés la ampliación de la base de datos, con una mayor representación de edades, calidades de sitio y esquemas selvícolas, analizando no solo el estrato arbóreo sino también el estrato superficial, considerando la vegetación arbustiva y herbácea así como la biomasa resultante del desfronde o de los tratamientos selvícolas, ya que todo ello en su conjunto, y teniendo en cuenta el suelo, permitirá estimar el estado nutricional de la masa, la fijación de CO₂, su productividad y la susceptibilidad de la misma frente al fuego, para una secuencia de edades, calidades de estación y tratamientos selvícolas. En línea con esto, Álvarez-Álvarez *et al.* (2011), trabajando con *Pinus pinaster* en Asturias, concluyen que el estudio conjunto del estado nutricional de las hojas y las condiciones climáticas, fisiográficas y edáficas, puede resultar de gran ayuda para los gestores forestales, especialmente en la fase de establecimiento de nuevas plantaciones (selección de la especie más adecuada), con mayor importancia para las masas con un objetivo productivo.

6.3.2.5. Biomasa y fijación de carbono a nivel de masa

Los rodales de *Pinus pinaster* que conforman la red experimental de podas y claras del SERIDA presentaron, de media, una biomasa aérea total de 19,90 t/ha en el invierno 2005-2006 antes de poda, que se redujo a 16,61 t/ha en ese mismo invierno después de poda, y se incrementó a 45,31 t/ha en el invierno 2008-2009 y a 72,21 t/ha en el invierno 2010-2011. Hay que tener en cuenta que los valores obtenidos para los inviernos 2008-2009 y 2010-2011 deben ser considerados como orientativos ya que las ecuaciones empleadas para su cálculo son estáticas, permitiendo estimar la biomasa en un momento determinado, anterior e inmediatamente posterior a la intervención selvícola efectuada, no siendo posible evaluar el efecto real de la poda sobre la producción y reparto de la biomasa arbórea. En cualquier caso, la inclusión del ratio de copa como variable explicativa de los modelos de la biomasa de copa permitiría una aproximación mayor a la situación real de una masa podada que la obtenida a partir de ecuaciones definidas con variables dendrométricas menos relacionadas con la copa del árbol.

De forma comparativa, la mayor reducción de biomasa total tras la realización de la poda se observó en la parcela de Barcia, siendo ésta la única parcela de origen artificial, y la de mayor edad (11 años en el momento de poda frente a 7-8 años en el resto de los ensayos). En general, la biomasa total de esta parcela fue superior para todos los inventarios realizados (Tabla 6.16).

La acumulación anual de biomasa (ΔW) en las parcelas estudiadas fue, de media, de 11,67 t/ha año. Por otra parte, el C total secuestrado anualmente (ΔC) por las masas podadas fue, de media, de 6,68 t/ha año.

Tabla 6.16. Biomasa forestal total (t/ha), carbono total fijado (t/ha), incremento anual de biomasa (t/ha año) y de carbono (t/ha año), para la parte arbórea aérea, diferenciada por fracciones, en el conjunto de árboles pertenecientes a los ensayos permanentes de investigación de *Pinus pinaster*, en cada inventario realizado durante el período de estudio 2006-2011.

Parcela	Fracción	Antes de poda			Después de poda						
		W ₂₀₀₆	C ₂₀₀₆	W ₂₀₀₆	W ₂₀₀₉	W ₂₀₁₁	C ₂₀₀₆	C ₂₀₀₉	C ₂₀₁₁	ΔW	ΔC
Valsera	Madera	8,99	5,17	8,99	25,53	42,65	5,17	14,69	24,54	5,51	3,17
	Corteza	2,36	1,33	2,36	5,46	8,45	1,33	3,08	4,78	1,50	0,85
	Finos de la copa	2,44	1,39	0,93	4,10	8,40	0,53	2,34	4,80	1,49	0,85
	Ramas de la copa	3,75	2,13	2,16	7,18	12,49	1,23	4,09	7,11	2,07	1,18
	Total aéreo	17,53	10,03	14,43	42,26	71,99	8,27	24,20	41,23	11,51	6,59
Barcia	Madera	18,02	10,37	18,02	35,26	50,41	10,37	20,29	29,01	5,75	3,31
	Corteza	3,84	2,17	3,84	6,77	9,24	2,17	3,83	5,22	1,24	0,70
	Finos de la copa	5,90	3,37	2,69	6,93	11,10	1,54	3,96	6,34	1,68	0,96
	Ramas de la copa	8,08	4,60	5,12	10,84	15,70	2,92	6,17	8,94	2,12	1,20
	Total aéreo	35,84	20,51	29,66	59,79	86,45	16,99	34,24	49,51	11,36	6,50
Monteagudo	Madera	5,44	3,13	5,44	26,45	44,41	3,13	15,22	25,56	7,00	4,03
	Corteza	1,56	0,88	1,56	5,61	8,64	0,88	3,17	4,88	1,51	0,85
	Finos de la copa	1,37	0,78	0,61	5,33	10,59	0,35	3,04	6,05	2,00	1,14
	Ramas de la copa	2,47	1,40	1,54	8,92	15,18	0,87	5,08	8,64	2,73	1,55
	Total aéreo	10,84	6,20	9,15	46,31	78,81	5,24	26,51	45,13	13,93	7,98
Uría	Madera	7,78	4,47	7,78	18,96	29,52	4,47	10,91	16,99	3,73	2,14
	Corteza	2,15	1,22	2,15	4,52	6,62	1,22	2,55	3,74	1,05	0,59
	Finos de la copa	2,00	1,14	0,96	3,35	5,94	0,55	1,91	3,40	1,00	0,57
	Ramas de la copa	3,48	1,98	2,29	6,07	9,49	1,30	3,45	5,40	1,44	0,82
	Total aéreo	15,41	8,82	13,18	32,89	51,57	7,54	18,83	29,53	7,68	4,40

donde W_j es la biomasa total arbórea de la parte aérea, estimada para cada fracción e inventario, en t/ha; C_j es el carbono total fijado en la parte aérea, estimado para cada fracción e inventario, en t/ha; j es el año de inventario ($j = 2006$ invierno 2005-2006-; 2009 - invierno 2008-2009-; y 2011 - invierno 2010-2011); ΔW es la biomasa total producida cada año (período 2006-2011) en t/ha año; y ΔC es el carbono fijado cada año (período 2006-2011), en t/ha año.

La relación existente entre el carbono total fijado (C) y la biomasa forestal total (W) fue, para los cuatro rodales de *Pinus pinaster* estudiados, del 57,3%. Esta proporción resultó ligeramente superior a la observada por Montero *et al.* (2005) en la Península Ibérica o Balboa-Murias *et al.* (2006) en Galicia para la misma especie,

quienes reportaron proporciones del 51,1% y 48%, respectivamente. En ambos trabajos, fueron analizadas masas adultas, pudiendo ser ésta una de las razones que ayude a explicar las diferencias observadas. Otros estudios como Laiho y Laine (1997), o Lamloom y Savidge (2003), han observado la variación de este valor entre especies, dentro de una misma especie, e incluso según la fracción arbórea, con valores que varían entre el 47% y el 59%. Autores como Bert y Danjon (2006), trabajando con masas adultas de *Pinus pinaster* en Francia, muestran la variación de la concentración de C dentro del mismo árbol, con valores superiores al 50,0% en todas las fracciones (aéreas y subterráneas). Por tanto, de acuerdo con los ejemplos mostrados, así como las diferencias obtenidas en este trabajo en relación con otros estudios desarrollados para la misma especie, parece poco aconsejable utilizar en masas de *Pinus pinaster* el valor estándar del 50%, definido en diversos trabajos (p.e. Matthews, 1993; Slijepcevic, 2001; Broadmeadow y Matthews, 2003) como la proporción de biomasa aérea correspondiente con el contenido de C. De acuerdo con esto, y a pesar de ser ampliamente aceptado ese 50%, parece conveniente estimar su valor siempre que sea posible para las diferentes especies forestales.

Tal y como se muestra en la Figura 6.14, la poda realizada en las parcelas de ensayo supuso la eliminación del 5%, 23% y 46% de los finos de la copa, y del 10%, 39% y 68% de las ramas de la copa, para las severidades de poda del 15%, 30% y 45%, respectivamente. Estas proporciones de biomasa de la copa fueron agregadas al mantillo e incorporadas al suelo en los casos en que fue posible la trituración de los restos generados. La incorporación de la biomasa residual de la poda al suelo, supuso la reincorporación del 3%, 11% y 20% del total de la biomasa aérea para las severidades del 15%, 30% y 45%, respectivamente. De acuerdo con estas cifras, y en línea con los resultados observados por Geldres *et al.* (2006), para masas podadas de *Eucalyptus nitens* en Chile, la incorporación de la biomasa residual de la poda en el sistema forestal debe ser considerado un factor importante para el reciclado del C y de los elementos nutritivos del mismo. Esto será tanto más importante a mayor intensidad del tratamiento aplicado.

Las podas realizadas en los cuatro rodales estudiados, sin diferenciar la intensidad de los tratamientos, implicaron la extracción de aproximadamente el 50% de las ramas y el 35% de los elementos finos de la copa. Al tratarse de fracciones arbóreas de menor peso, su eliminación no supuso una reducción importante en el valor de la biomasa arbórea total existente en cada rodal. Igualmente, la extracción de C fijado, asociado a la biomasa eliminada en la poda, supuso una reducción baja del C total secuestrado en las cuatro parcelas estudiadas (t/ha). Sin embargo, tal y como se ha ido comentando a lo largo de este capítulo, el importante papel de las fracciones finas en el conjunto del sistema forestal (balance nutricional, riesgo de incendio y sanitario, etc.) hace que la posterior gestión de los restos de poda adquiera especial interés, dado el impacto que supone para el sistema forestal el tipo de tratamiento

realizado con dichos restos. Todo lo anterior lleva a recalcar una vez más la importancia de seguir profundizando en el estudio de la gestión selvícola de las masas de *Pinus pinaster*, y su influencia en los diferentes factores asociados a la biomasa existente en las mismas (nutrientes, C fijado, riesgo de incendio y sanitario, procesos ecofisiológicos, productividad de la masa, etc.).

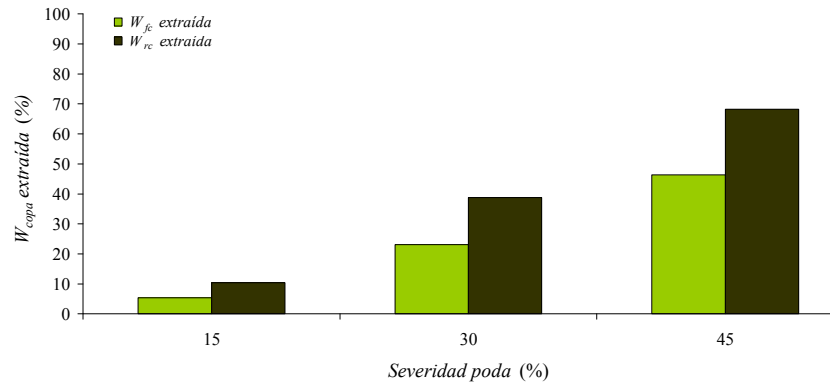


Figura 6.14. Porcentaje de biomasa de copa (finos de la copa (W_{fc}) y de ramas de la copa (W_{rc})), extraído en la poda realizada en el invierno 2005-2006 en las parcelas permanentes de ensayo de *Pinus pinaster*.

En cualquier caso, como ya se ha comentado anteriormente, los valores aquí mostrados fueron estimados a partir de las ecuaciones de biomasa definidas inicialmente en este trabajo, en las que no fue considerada la posible redistribución de los componentes arbóreos como consecuencia de la poda, siendo por tanto necesario complementar esta parte del trabajo cuantificando la influencia de la selvicultura aplicada para una interpretación más aproximada de la biomasa real existente en los años sucesivos a las intervenciones.

Por otra parte, además de la biomasa forestal, correspondiente con el conjunto de árboles de la masa, y cuya contribución a la biomasa aérea es de gran importancia (Singh *et al.*, 2011), tal y como se ha comentado anteriormente, una correcta evaluación del contenido de C de una masa forestal, debe incluir asimismo la biomasa existente en el estrato superficial (matorral, herbáceas y material arbóreo caído al suelo), la parte subterránea de los árboles y el suelo forestal, factores que en su conjunto van a jugar un papel fundamental en la reserva de C y el balance de nutrientes del sistema. De todos ellos, y de acuerdo con Laurance *et al.* (1999) y Roggy *et al.* (1999), cabe destacar el suelo por la influencia que su contenido nutricional tiene en la capacidad de almacenaje de C de una masa. En cualquier caso, y tal y como recogen Mosquera-Losada *et al.* (2011), el secuestro de C de un sistema forestal dependerá de diversos factores como la especie, la edad del arbolado, la densidad de plantación, las condiciones edafo-climáticas, la gestión forestal y la fertilización, complicando aun más la evaluación del contenido de C.

6.3.3. Distribución de la densidad de combustibles finos en el dosel de copas

6.3.3.1. Estimación del perfil de densidad aparente del combustible fino, y las variables *CBDe* y *CBH* antes y después de poda: situación real

En la Tabla 6.17 se muestran los valores de *CBDe* y *CBH* obtenidos antes y después de la poda en las cuatro parcelas permanentes de ensayo de la red experimental de podas y claras del SERIDA. Además, se incluyen los porcentajes de incremento de I'_L y R'_{activo} de los tratamientos frente al control que, según el modelo de Van Wagner (1977), regulan la transición de un fuego de superficie a un fuego de copas y la tipología de éste (activo o pasivo), respectivamente.

Tabla 6.17. Valores medios y desviación estándar (entre paréntesis) de *CBDe* y *CBH* obtenidos en las cuatro parcelas permanentes de *Pinus pinaster*, para los diferentes inventarios realizados; e incremento (%) de la intensidad lineal crítica (I'_L) y de la velocidad de propagación crítica (R'_{activo}) asociado a los tratamientos selvícolas realizados en campo. Distintas letras indican distintos grupos en el test de comparación de medias de Tukey ($\alpha = 95\%$).

<i>Intensidad poda diseñada</i>	<i>CBDe</i>	<i>CBH</i>	$\Delta I'_L$	$\Delta R'_{activo}$
<i>Inventario 2005-2006 - Antes de poda</i>				
Control 0%	0,1638 (0,0605) ^a	1,6570 (0,2488) ^a	-	-
Poda 20%	0,1583 (0,0613) ^a	1,6777 (0,2647) ^a	-	-
Poda 40%	0,1582 (0,0684) ^a	1,6681 (0,2141) ^a	-	-
<i>Inventario 2005-2006 - Después de poda</i>				
Control 0%	0,1637 (0,0605) ^a	1,7441 (0,2746) ^c	-	-
Poda 20%	0,1567 (0,0616) ^a	1,9969 (0,3669) ^b	23	5
Poda 40%	0,1492 (0,0683) ^a	2,2843 (0,3969) ^a	50	9
<i>Inventario 2008-2009 - Después de poda</i>				
Control 0%	0,2604 (0,0714) ^a	1,7389 (0,2695) ^c	-	-
Poda 20%	0,2185 (0,0682) ^b	1,9923 (0,3659) ^b	23	19
Poda 40%	0,1958 (0,0634) ^c	2,2778 (0,3936) ^a	50	33
<i>Inventario 2010-2011 - Después de poda</i>				
Control 0%	0,3245 (0,0788) ^a	1,7388 (0,2695) ^c	-	-
Poda 20%	0,2774 (0,0678) ^b	1,9919 (0,3658) ^b	23	17
Poda 40%	0,2542 (0,0548) ^b	2,2769 (0,3933) ^a	50	28

donde *Intensidad poda diseñada* se refiere al % de L_{copa_v} a eliminar, de acuerdo con el diseño experimental (ver apartado 2.2.2, capítulo 2); *CBDe* es la densidad aparente efectiva del rodal, en kg/m^3 ; *CBH* es la altura de la base de la copa a la que se alcanza una densidad aparente de $0,037 \text{ kg/m}^3$ (Sando y Wick, 1972), en m; $\Delta I'_L$ es el incremento de la intensidad lineal crítica para cada tratamiento de poda, respecto al control, en cada inventario, en %; y $\Delta R'_{activo}$ es el incremento de la velocidad crítica para cada tratamiento de poda, respecto al control, en cada inventario, en %.

En general, los resultados del análisis de varianza indicaron diferencias significativas en los valores medios de *CBDe* y *CBH* después de los tratamientos. El valor de *CBDe* se vio reducido con la poda para cada inventario realizado. Así, la media más alta, para todos los inventarios llevados a cabo tras la poda, fue siempre para el control (valores de 0,16 kg/m³ a 0,32 kg/m³ en el primer y último inventario después de poda, respectivamente), siendo las subparcelas intervenidas con podas del 40% las que alcanzaron el menor valor de *CBDe* (valores de 0,15 kg/m³ a 0,25 kg/m³ en el primer y último inventario después de poda, respectivamente). A pesar de que no se apreciaron diferencias significativas en la reducción de *CBDe* para el inventario efectuado en el año de la poda, tras la ejecución de los tratamientos, el valor de *CBDe* disminuyó entre un 4% y un 9% para los tratamientos del 20% y del 40% con respecto al control, respectivamente. En los siguientes inventarios, realizados tres y cinco años después de la poda (inviernos 2008-2009 y 2010-2011, respectivamente), los tratamientos efectuados mostraron reducir significativamente el valor de *CBDe* en relación con el tratamiento control medido en el mismo inventario. Así, *CBDe* se redujo tres años después de la poda, entre un 16% y un 25% para las podas del 20% y del 40%, respectivamente. Por otro lado, cinco años después de la poda la reducción de *CBDe* fue de un 15% y un 22% para los mismos tratamientos. La menor diferencia observada entre los tratamientos de poda y el control para el último inventario realizado podría indicar una cierta recuperación de la producción de biomasa de los árboles podados, con el consecuente incremento del valor de *CBDe*. En cualquier caso, se debe tener en cuenta que las estimaciones de *CBDe* han sido realizadas a partir de ecuaciones de biomasa construidas para masas no tratadas selvícolamente, por lo que no ha sido posible evaluar la influencia real de la poda en la producción de biomasa y por tanto en el valor de *CBDe*.

Hay que destacar que, en todos los casos, los valores medios de *CBDe* obtenidos estuvieron por encima de 0,10 kg/m³, valor limitante que ha sido empíricamente deducido por Agee (1996), y asumido por otros autores (Alexander, 1998; Cruz *et al.*, 2005), siendo aceptado que por debajo de dicho valor la probabilidad de propagación de un fuego activo de copas se reduce considerablemente. Los valores de *CBDe* obtenidos en los dos primeros inventarios (invierno 2005-2006), antes y después de la poda, resultaron ser comparativamente más bajos que los valores de *CBD* observados por Cruz *et al.* (2003b) para *Pseudotsuga menziesii* (0,18 kg/m³), *Pinus ponderosa* (0,18 kg/m³), *Pinus contorta* (0,18 kg/m³) y bosques mixtos de coníferas (0,32 kg/m³) en la zona oeste de Norte América; por Reinhardt *et al.* (2006b) para masas mixtas irregulares no aclaradas de *Pseudotsuga menziesii* y *Pinus contorta* en Idaho (Estados Unidos) (0,09 kg/m³ a 0,26 kg/m³); por Mitsopoulos y Dimitrakopoulos (2007) para masas regulares (0,15 kg/m³ a 0,22 kg/m³) e irregulares (0,09 kg/m³ a 0,20 kg/m³) de *Pinus halepensis* en Grecia; por Crecente-Campo *et al.* (2009) para *Pinus sylvestris* en Galicia (de 0,44 kg/m³ para

masas sin aclarar a $0,51 \text{ kg/m}^3$ para masas sometidas a una clara fuerte); o el valor de *CBDe* obtenido por Ruiz-González y Álvarez-González (2011) para *Pinus radiata* en Galicia ($0,21 \text{ kg/m}^3$). Hay que tener en cuenta que, a excepción del último trabajo citado, las metodologías empleadas para la estimación de *CBD* son distintas, lo que dificulta la comparación entre resultados. De todos modos, estas diferencias podrían ser también debidas a la menor edad de las masas estudiadas, en las que la carga de combustible resultó ser inferior. En línea con esto, y atendiendo a la Tabla 6.17, los sucesivos inventarios realizados en las parcelas estudiadas mostraron un incremento del valor de *CBDe* para todos los tratamientos, lo que confirma la relación existente entre la carga de combustible con la edad del rodal. Otro factor que puede estar relacionado con las diferencias observadas es la selvicultura aplicada, dada la influencia de los tratamientos selvícolas en la estructura del rodal. Así, masas no intervenidas selvícolamente muestran mayor carga de combustible (p.e. Crecente-Campo *et al.*, 2009). Esta apreciación puede observarse nuevamente en la Tabla 6.17, en donde los tratamientos control presentan el mayor valor de *CBDe*. Por último, comentar que, al igual que la biomasa arbórea, el valor de *CBDe* se encuentra influenciado por un conjunto de factores asociados con la especie y condiciones de crecimiento, lo que dificulta la generalización del valor de *CBDe* de un rodal, siendo por necesario el estudio de esta variable para cada caso concreto.

Por otro lado, la modificación de *CBDe* ha implicado el aumento de la velocidad de propagación crítica (R'_{activo}) necesaria para que el fuego llegue a propagarse por el dosel de copas como un fuego de copas activo, variando este aumento del 5%, para el tratamiento de poda del 20% en el inventario 2005-2006 después de poda, hasta el 33%, para el tratamiento de poda del 40% en el inventario 2008-2009 después de poda. Por tanto, de acuerdo con estos valores, la realización de la poda dificultaría la ocurrencia de un fuego de copas activo, en el caso de que el fuego de superficie se transmitiese a las copas, siendo mayor la dificultad a mayor intensidad de poda.

La poda aumentó el valor de *CBH* de forma significativa, con incrementos que variaron entre el 15% para el tratamiento de poda del 20% (1,99 m) y el 31% para la poda del 40% (2,28 m). Así, la media más baja de *CBH* se correspondió con el tratamiento control (1,66 m) antes de la poda (invierno 2005-2006), siendo la media más alta la correspondiente con el tratamiento del 40% tras la intervención de poda (2,28 m) para todo el período de estudio (invierno 2005-2006 a invierno 2010-2011). A pesar de que el valor de *CBH* no se vio modificado para los inventarios realizados en los años posteriores a los tratamientos, el efecto de esta intervención selvícola sí mostró ser significativo, esperando que su valor se vea incrementado a mayores intensidades de la poda. El hecho de que los valores de dicha variable, obtenidos para los diferentes inventarios, resultasen diferentes significativamente para los tratamientos de poda efectuados, en relación con el tratamiento control, adquiere gran importancia desde el punto de vista del riesgo de incendio.

El valor medio de *CBH* obtenido en este trabajo, para los diferentes inventarios realizados, fue inferior al reportado por autores como Cruz *et al.* (2003b) para *Pinus ponderosa* (4,5 m), *Pseudotsuga menziesii* (5,7 m), bosques mixtos de coníferas (5,7 m) y *Pinus contorta* (6,1 m) en Norte América; Alexander *et al.* (2004) para *Pinus banksiana* Lamb. y *Picea mariana* (Mill.) en Canadá (3,2 m a 8,2 m); Mitsopoulos y Dimitrakopoulos (2007) para masas regulares (4,5 m a 6,5 m) e irregulares (3,0 m a 5,0 m) de *Pinus halepensis* en Grecia; o, Ruiz-González y Álvarez-González (2011) para *Pinus radiata* en Galicia (8,23 m (primer inventario) a 13,29 m (tercer inventario)). Nuevamente la menor edad de las masas estudiadas y, por tanto, la menor altura del arbolado, es la principal razón por la que el valor de la variable *CBH* obtenida ha resultado menor a la observada en otros trabajos. Asimismo, el origen natural de la mayoría de los rodales estudiados supone una estructura más irregular del dosel de copas, con árboles de menor tamaño en la parte inferior del estrato aéreo, y por ello una distribución de la biomasa de copa con mayor carga del combustible en las capas inferiores del rodal, en comparación con las masas adultas, en las que las copas comienzan a mayor altura, con una distribución de la biomasa de copa desplazada hacia zonas superiores del estrato aéreo.

Por otra parte, las variaciones de *CBH* para el conjunto de inventarios han supuesto, a igualdad del valor de humedad foliar (*FMC*), un aumento de la intensidad lineal crítica (I'_L) necesaria para que un fuego de superficie transite hacia las copas, con incrementos del 23% para la poda de menor intensidad (20%) y del 50% para la poda de mayor intensidad (40%). Por tanto, y atendiendo a lo comentado para la I'_L , el riesgo de un incendio de copas activo en las subparcelas de poda estudiadas ha mostrado ser menor a mayor intensidad del tratamiento de poda.

El seguimiento de los ensayos permanentes del SERIDA y la cuantificación de las variables *CBD* y *CBH* podría aportar mayor información acerca del efecto real de los tratamientos de poda en masas regulares de *Pinus pinaster* subesp. atlántica sobre la producción y distribución de biomasa y, por tanto, sobre el riesgo de inicio y propagación de un incendio de copas a medio-largo plazo.

6.3.3.2. Estimación del perfil de densidad aparente del combustible fino, y las variables *CBDe* y *CBH* antes y después de podas y/o claras: simulación de los tratamientos selvícolas

Dada la importancia de realizar de forma conjunta podas y claras para la optimización de la producción maderera de una masa forestal, y dado que no se contaba con datos de las claras en las masas estudiadas en el momento del análisis, fueron simulados tratamientos de podas y claras, solos y combinados, con intensidades de 10% en 10%, hasta un máximo del 60% del criterio establecido para definir la intensidad de cada intervención (L_{copa} para la poda y G para la clara). En la

Tabla 6.18 se muestran los resultados de los valores de las LS-medias de *CBDe* y *CBH* estimadas para cada uno de los tratamientos simulados en las parcelas permanentes de ensayo. Al igual que en la tabla anterior, se incluyen los porcentajes de incremento de I'_L y la R'_{activo} de los tratamientos con respecto al control.

Tabla 6.18. Valores de las LS-medias de *CBDe* y *CBH* obtenidos para los distintos tratamientos de podas y claras, solos o combinados, simulados; altura a la que se alcanza el valor de *CBDe* e incremento (%) de la intensidad lineal crítica (I'_L) y de la velocidad de propagación crítica (R'_{activo}) asociado a los tratamientos simulados. Distintas letras indican distintos grupos en el test de comparación de medias de Tukey ($\alpha = 95\%$).

<i>Intensidad tratamiento simulado</i>	<i>CBDe</i>	<i>CBH</i>	$\Delta I'_L$	$\Delta R'_{activo}$
<i>Tratamiento Control</i>				
Control 0%	0,1575 ^a	1,6723 ^b	-	-
<i>Tratamiento de poda</i>				
Poda 10%	0,1575 ^a	1,6726 ^b	-	-
Poda 20%	0,1575 ^a	1,8214 ^a	14	-
Poda 30%	0,1575 ^a	2,1817 ^a	49	-
Poda 40%	0,1563 ^a	2,6292 ^a	97	1
Poda 50%	0,1345 ^b	3,1585 ^a	160	17
Poda 60%	0,0904 ^b	3,8290 ^a	246	74
<i>Tratamiento de clara</i>				
Clara 10%	0,1466 ^b	1,7845 ^b	10	7
Clara 20%	0,1315 ^b	1,8918 ^a	20	20
Clara 30%	0,1160 ^b	2,0107 ^a	32	36
Clara 40%	0,1001 ^b	2,1481 ^a	46	57
Clara 50%	0,0841 ^b	2,2923 ^a	60	87
Clara 60%	0,0675 ^b	2,5415 ^a	87	133
<i>Tratamiento de poda combinada con clara</i>				
Clara 10% Poda 10%	0,1466 ^b	1,7845 ^b	10	7
Clara 10% Poda 20%	0,1466 ^b	1,9012 ^a	21	7
Clara 10% Poda 30%	0,1466 ^b	2,2660 ^a	58	7
Clara 10% Poda 40%	0,1461 ^b	2,7308 ^a	109	8
Clara 10% Poda 50%	0,1293 ^b	3,2538 ^a	171	22
Clara 10% Poda 60%	0,0887 ^b	3,8841 ^a	254	78
Clara 20% Poda 10%	0,1315 ^b	1,8918 ^a	20	20
Clara 20% Poda 20%	0,1315 ^b	1,9752 ^a	28	20
Clara 20% Poda 30%	0,1315 ^b	2,3330 ^a	65	20
Clara 20% Poda 40%	0,1313 ^b	2,8112 ^a	118	20

Tabla 6.18 (continuación). Valores de las LS-medias de *CBDe* y *CBH* obtenidos para los distintos tratamientos de podas y claras, solos o combinados, simulados; altura a la que se alcanza el valor de *CBDe* e incremento (%) de la intensidad lineal crítica (I'_L) y de la velocidad de propagación crítica (R'_{activa}) asociado a los tratamientos simulados. Distintas letras indican distintos grupos en el test de comparación de medias de Tukey ($\alpha = 95\%$).

<i>Intensidad tratamiento simulado</i>	<i>CBDe</i>	<i>CBH</i>	$\Delta I'_L$	$\Delta R'_{activa}$
<i>Tratamiento de poda combinada con clara</i>				
Clara 20% Poda 50%	0,1191 ^b	3,3480 ^a	183	32
Clara 20% Poda 60%	0,0836 ^b	3,9743 ^a	266	88
Clara 30% Poda 10%	0,1160 ^b	2,0107 ^a	32	36
Clara 30% Poda 20%	0,1160 ^b	2,0665 ^a	37	36
Clara 30% Poda 30%	0,1160 ^b	2,4033 ^a	72	36
Clara 30% Poda 40%	0,1159 ^b	2,8805 ^a	126	36
Clara 30% Poda 50%	0,1068 ^b	3,4301 ^a	194	47
Clara 30% Poda 60%	0,0766 ^b	4,0657 ^a	279	106
Clara 40% Poda 10%	0,1001 ^b	2,1481 ^a	46	57
Clara 40% Poda 20%	0,1001 ^b	2,1828 ^a	49	57
Clara 40% Poda 30%	0,1001 ^b	2,4881 ^a	81	57
Clara 40% Poda 40%	0,1001 ^b	2,9584 ^a	135	57
Clara 40% Poda 50%	0,0934 ^b	3,5180 ^a	205	69
Clara 40% Poda 60%	0,0681 ^b	4,1672 ^a	293	131
Clara 50% Poda 10%	0,0841 ^b	2,2923 ^a	60	87
Clara 50% Poda 20%	0,0841 ^b	2,3116 ^a	63	87
Clara 50% Poda 30%	0,0841 ^b	2,5673 ^a	90	87
Clara 50% Poda 40%	0,0841 ^b	3,0407 ^a	145	87
Clara 50% Poda 50%	0,0792 ^b	3,6074 ^a	217	99
Clara 50% Poda 60%	0,0588 ^b	4,2949 ^a	312	168
Clara 60% Poda 10%	0,0675 ^b	2,5415 ^a	87	133
Clara 60% Poda 20%	0,0675 ^b	2,5481 ^a	88	133
Clara 60% Poda 30%	0,0675 ^b	2,7127 ^a	107	133
Clara 60% Poda 40%	0,0675 ^b	3,1503 ^a	159	133
Clara 60% Poda 50%	0,0642 ^b	3,7180 ^a	232	145
Clara 60% Poda 60%	0,0484 ^b	4,4934 ^a	340	225

donde *Intensidad tratamiento simulado* es la intensidad de poda (% de L_{copa}) y/o de clara (% de G) simulada; *CBDe* es la densidad aparente efectiva del rodal, en kg/m^3 ; *CBH* es la altura de la base de la copa en la que la densidad aparente es de $0,037 \text{ kg/m}^3$ (Sando y Wick, 1972), en m; $\Delta I'_L$ es el incremento de la intensidad lineal crítica para cada tratamiento, respecto al control, en %; y $\Delta R'_{activa}$ es el incremento de la velocidad crítica para cada tratamiento, respecto al control, en %.

Tal y como se puede apreciar en la Tabla 6.18, si consideramos tan solo la poda, el valor de $CBDe$ se ve reducido de forma significativa a partir de intensidades de poda del 50% de longitud de copa (L_{copa}) eliminada. Para una simulación de clara por lo bajo, el valor de $CBDe$ se reduce de forma significativa a partir de intensidades del 10% del área basimétrica extraída ($G_{extraída}$). Por otra parte, la realización conjunta de podas y claras será efectiva en la reducción de $CBDe$ para cualquier combinación de las dos intervenciones. Para la variable CBH , la influencia de la poda adquiere mayor importancia. Así, el valor de CBH se ve significativamente aumentado a partir de intensidades de poda del 20% de L_{copa} eliminada. Para una simulación tan solo de claras, el incremento del valor de CBH empieza a ser significativo a partir de intervenciones que supongan una extracción de al menos el 20% del área basimétrica de la masa (G). Por otro lado, el planteamiento de una gestión conjunta de podas y claras, lograría un aumento significativo del valor de CBH , con respecto al control, para cualquier combinación de ambas intervenciones selvícolas, a excepción de la clara más debil planteada (10% de $G_{extraída}$), que debe ser combinada con una poda de al menos un 20% de L_{copa} eliminada para que la modificación de la variable CBH resulte significativa. En cualquier caso, el valor de CBH se ha visto claramente aumentado a partir de intensidades de clara del 30% de G , independientemente de la intensidad de poda.

Al igual que se comentó anteriormente para la situación real, la modificación del valor del $CBDe$ ha implicado el aumento de la velocidad de propagación crítica (R'_{activo}) necesaria para que un posible fuego de copas se propague de forma activa. En este caso, las simulaciones realizadas mostraron que las claras son tratamientos selvícolas más efectivos que las podas para la modificación de esta variable (R'_{activo}). Los menores incrementos de R'_{activo} se obtuvieron al simular tratamientos de poda sin clara, siendo necesario efectuar intervenciones con intensidades mínimas del 40% de L_{copa} eliminada para lograr un aumento de esta variable. Las claras, sin embargo, mostraron un incremento de R'_{activo} para todas las intensidades simuladas. El mayor aumento de R'_{activo} (225%) fue observado para los tratamientos combinados de podas y claras de mayor intensidad (60% en ambas intervenciones). Para el caso de I'_L , el menor aumento de la variable (10%) fue obtenido para el tratamiento de clara del 10% de G , solo o combinado con poda del 10% de L_{copa} eliminada. La poda mostró una mayor influencia sobre esta variable, llegando a incrementar su valor en un 246% para la intensidad de poda del 60% de L_{copa} eliminada. De todas las simulaciones planteadas, el mayor incremento de I'_L (340%) se obtuvo para el esquema selvícola que combina los tratamientos de podas y claras de mayor intensidad (60% de ambas intervenciones). Se debe tener en cuenta que el mayor valor de esta variable (I'_L) conlleva que un posible incendio de superficie necesite una mayor intensidad para poder alcanzar a las copas. Por tanto, y de acuerdo con los resultados comentados, la modificación de la estructura de la masa mediante

podas y claras supuso un incremento en los valores de R'_{activo} e I'_L , dificultando la generación de un incendio de copas.

En la Figura 6.15 se pueden observar los cambios del perfil de densidad aparente para las diferentes combinaciones de podas y claras consideradas en las simulaciones, para una subparcela de poda con un valor de CBD_e medio. Los perfiles mostrados no tuvieron que ser suavizados, lo que podría deberse a la edad joven de las masas estudiadas (diferenciación por estratos menos marcada que en masas de mayor edad), ya que tal y como observaron Ruiz-González y Álvarez-González (2011), el perfil de distribución de la densidad aparente se vuelve más irregular con la edad.

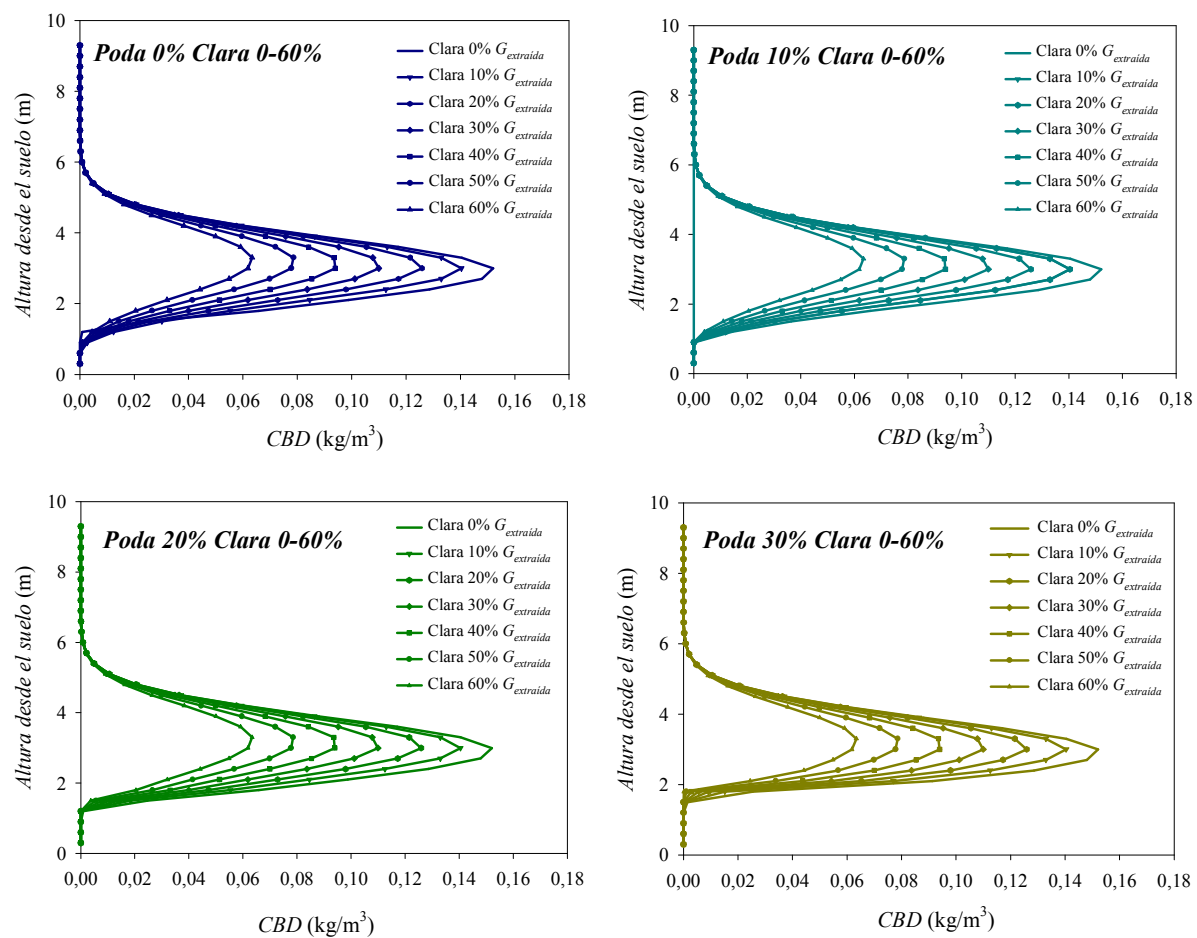


Figura 6.15. Perfil de la densidad aparente del combustible fino disponible en el dosel de copas (CBD , kg/m^3) para una subparcela de poda de CBD_e medio, perteneciente a la red de ensayos permanentes de *Pinus pinaster*, para diferentes tratamientos de podas y claras simulados de 10% en 10% (de 0% a 60%).

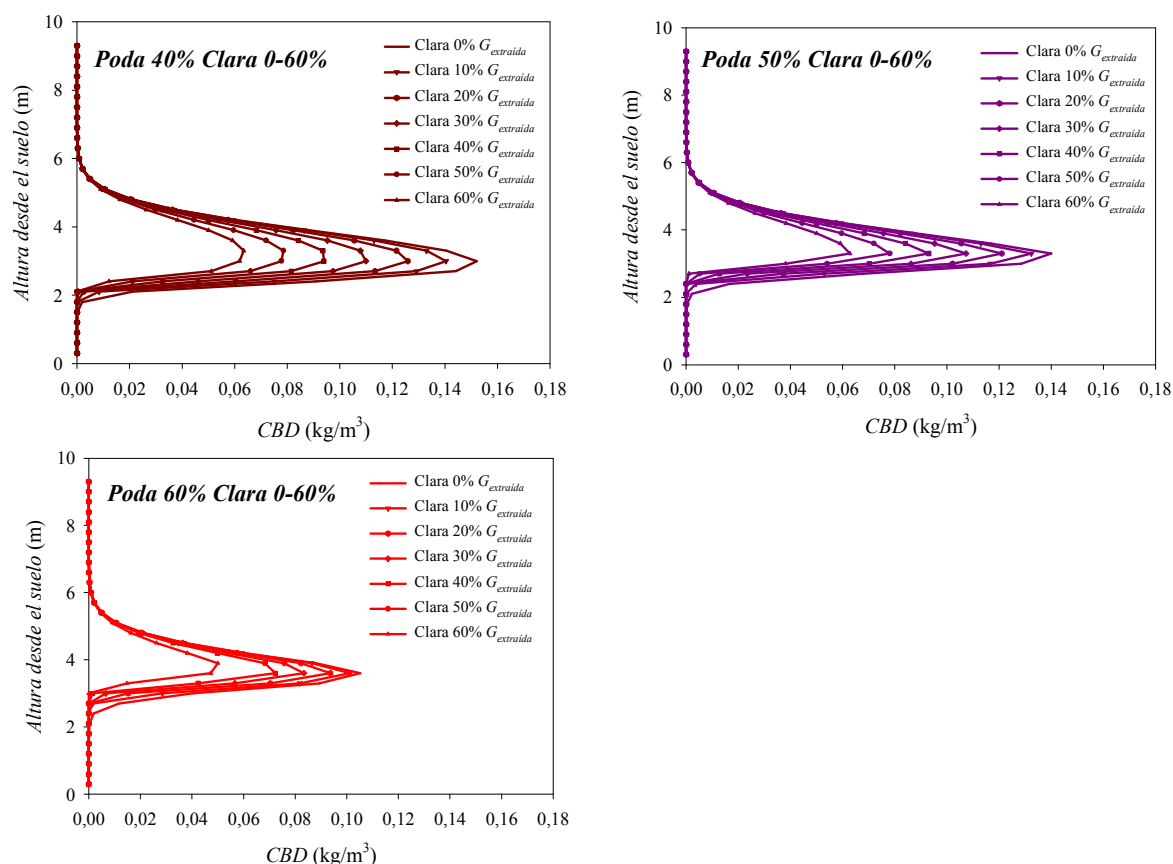


Figura 6.15 (continuación). Perfil de la densidad aparente del combustible fino disponible en el dosel de copas (CBD , kg/m^3) para una subparcela de poda de CBD_e medio, perteneciente a la red de ensayos permanentes de *Pinus pinaster*, para diferentes tratamientos de podas y claras simulados de 10% en 10% (de 0% a 60%).

De acuerdo con los valores mostrados, para las simulaciones efectuadas, la actuación conjunta de podas y claras fue el esquema selvícola más efectivo para la protección de la masa frente al fuego, siendo mayor dicha protección a mayor intensidad de los tratamientos. La reducción de CBD y el incremento de CBH , a través de una silvicultura de podas y claras, ha sido considerado también por Scott *et al.* (2005) como una técnica efectiva para reducir la ocurrencia y severidad de un incendio de copas. Según Scott y Reinhardt (2007b), CBD es el factor principal del que depende el comportamiento del fuego, y depende a su vez de la especie y la densidad del sitio. Por su parte, CBH depende también de la especie y del crecimiento del árbol, lo que a su vez implica la densidad del sitio y muchas otras características que afectan a la dimensión de la copa.

Autores como Agee y Skinner (2005), Fernandes y Rigolot (2007) o Bennett (2010) han incluido las podas y las claras como intervenciones claves para la protección de las masas de coníferas frente al fuego, recomendando, por lo general, tres pautas de actuación para reducir el riesgo de incendio: (1) reducir la acumulación del combustible de superficie o modificar su estructura, para limitar la intensidad de un potencial incendio; (2) podar los árboles y eliminar la continuidad

de los combustibles, subiendo la base de la copa; y (3) aclarar las masas reduciendo la densidad foliar y la continuidad horizontal. En cualquier caso, a pesar de que las masas tratadas con podas y claras parecen ser *a priori* menos susceptibles a los fuegos de copas que aquellas que no han sido intervenidas, para una gestión óptima de la masa se deberán integrar además un conjunto de criterios que deben ser considerados a la hora de decidir la intensidad más adecuada de los tratamientos selvícolas, no solo desde el punto de vista del riesgo de incendio, sino también en función del objetivo de la masa (p.e. producir madera de calidad), y su correcto desarrollo (principalmente estabilidad y crecimiento de la masa remanente). En suma, el comportamiento de un posible incendio forestal se va a ver modificado a su vez por las condiciones meteorológicas (especialmente temperatura y viento), las condiciones del terreno (principalmente la pendiente), la humedad de los combustibles o la gestión de la masa (estratos arbóreo y superficial) y de los restos generados.

Diversos trabajos han mostrado la influencia de la selvicultura de podas y/o claras en el inicio y comportamiento de un fuego de copas. La poda, que ha sido menos estudiada para esta especie, ha mostrado ser un tratamiento de gran interés por la menor continuidad vertical de los combustibles y, por tanto, la mayor protección de la masa ante un incendio forestal, dificultando que un posible incendio de superficie pueda alcanzar a las copas. En suma, y de acuerdo con Bennett (2010), el tratamiento de poda resulta particularmente efectivo en masas jóvenes, en donde las copas se encuentran más cercanas al suelo, como es el caso de las masas estudiadas en el presente trabajo. La realización de la clara, que ha sido más estudiada que la poda para esta especie, presenta como mayor ventaja la obtención de un mayor espaciamiento entre los árboles, dificultando la posible propagación de un incendio de copas. Así, autores como Keeves y Douglas (1983) comprobaron que en masas aclaradas, en las que se había iniciado un fuego de superficie, éste no se propagaba por las copas, salvo cuando existía regenerado bien desarrollado. Otros como Smith (1992) observaron que en masas podadas y aclaradas el fuego de superficie no alcanzaba tampoco a las copas. Scott y Reinhardt (2007b), llevaron también a cabo diversas simulaciones de podas y claras, en cinco tipos diferentes de masas forestales, afirmando que los tratamientos simulados resultaban efectivos para la modificación de los combustibles frente a un incendio forestal. Reinhardt y Holsinger (2010), obtuvieron una reducción de la severidad de los incendios y la ocurrencia de fuegos de copas para una situación de claras simuladas con diferentes especies de coníferas situadas en zonas montañosas de los Estados Unidos. Para el caso particular del noroeste peninsular, Crecente-Campo *et al.* (2009), llevaron a cabo un estudio sobre la influencia de las claras en el riesgo de incendio de masas de *Pinus sylvestris*. Para ello, realizaron una estimación de la biomasa fina presente en cada árbol, y determinaron el valor de *CBD* para cada rodal, entendido éste como la

relación existente entre la biomasa de finos total y el volumen de las copas. Para este trabajo, los tratamientos de clara mostraron su influencia sobre la estructura de la masa, con una reducción del riesgo de incendio para las masas aclaradas, gracias a la reducción del CBD. En el caso concreto de *Pinus pinaster*, Chambonnet (2005) recomienda una gestión de las masas de esta especie en la que se realice una clara temprana, reduciendo el número de árboles a 400 pies/ha, o incluso menos, protegiendo mejor a la masa frente al fuego y favoreciendo el crecimiento y la calidad de la madera de los árboles que permanecen en pie.

Sin embargo, tal y como se adelantó en la parte introductoria de este capítulo, las podas y las claras pueden llevar asociado un incremento del riesgo de incendio debido a la modificación de las condiciones del estrato superficial tras la realización de ambas intervenciones selvícolas, especialmente para los tratamientos de clara baja fuerte. Las principales desventajas asociadas a estas intervenciones frente al comportamiento del fuego, son: (1) el aumento de la carga de combustibles disponibles en la zona superficial, por los restos generados en las intervenciones selvícolas; (2) la reducción de la humedad de los combustibles, por el aumento del viento y de la temperatura tras la apertura de espacios en el dosel de copas; y (3) la mayor entrada de luz en el suelo forestal, favoreciendo la aparición de vegetación heliófila, que con el tiempo va a suponer también una mayor carga de combustible disponible en los estratos inferiores.

Todos estos inconvenientes comentados podrán verse mitigados, en gran medida, mediante la gestión del combustible del estrato superficial. Por ello, y de acuerdo a lo comentado a lo largo de este capítulo, la gestión adoptada con los restos selvícolas generados será de gran importancia para el sistema forestal intervenido, debiendo buscar un equilibrio entre conservar y garantizar la productividad de la masa, y proteger a la misma frente al fuego. En este sentido, se puede entender que los restos generados en la gestión selvícola de una masa supondrán una mayor cantidad y volumen de combustible disponible para la propagación del fuego cuanto mayor sea la densidad inicial de dicha masa, así como para la mayor intensidad de los tratamientos. Esta puntualización resulta de gran importancia para las masas de *Pinus pinaster* de la provincia asturiana, dadas las altas densidades de plantación utilizadas en muchas ocasiones (superiores a las 1.500 plantas/hectárea) así como las elevadas densidades de la mayoría de las masas naturales de la especie (pueden superar los 2.500 - 3.000 pies/ha), para llegar al final de la rotación a cerca de 400-600 pies/hectárea. A esta carga de combustible asociada con la gestión de la densidad de la masa, se suma el material procedente de las podas, así como la biomasa relacionada con el estrato superficial, siendo todo ello en su conjunto material con un importante papel en el riesgo y comportamiento de un incendio forestal.

Los restos generados en cualquiera de las intervenciones efectuadas en una masa forestal, deberán ser a su vez gestionados para la menor susceptibilidad de la masa frente al fuego. Como ya se ha comentado, la alternativa de extracción total de los residuos podría ser la más lógica para la reducción del riesgo de incendio, o incluso del riesgo sanitario. Sin embargo, esta opción conlleva un gasto económico que tan sólo será viable si los combustibles extraídos tienen un uso final que justifique su realización (p.e. uso energético, transformación de la madera). Asimismo, esta alternativa supone una extracción importante de nutrientes del sistema, que puede llevar asociada una pérdida importante en la productividad final de la masa, haciendo necesaria la fertilización de la misma, con el consiguiente gasto económico. El abandono de los restos sobre el terreno, supondrá un mayor riesgo de incendio, pero su presencia en el monte conlleva una reincorporación de los nutrientes en el sistema forestal. Otra de las opciones, quizá la más recomendable, es la trituración e incorporación de los restos al suelo, al no suponer un cambio importante para el sistema, tanto a nivel nutricional como a nivel del riesgo de incendio (no supone la extracción de una cantidad significativa de nutrientes ni el aumento del riesgo de incendio). Sin embargo, esta opción presenta un coste económico que debe ser considerado por el gestor. Por último, la alternativa quizá menos deseable es la quema de restos, con el consiguiente riesgo de propagación del incendio y la pérdida de nutrientes por volatilización. Así, por ejemplo, Jurgensen *et al.* (1997) destacan que durante la ocurrencia de un incendio forestal pueden producirse importantes pérdidas de ciertos nutrientes, especialmente de nitrógeno (N), dada su alta volatilidad.

La gestión selvícola del arbolado, y la gestión del estrato superficial, incluyendo el tratamiento de los restos selvícolas generados, adquieren, por tanto, un papel imprescindible en la prevención de incendios. Las actuaciones adoptadas para reducir el riesgo de ocurrencia de estos eventos, y, en su caso, de la superficie afectada, permiten evitar daños importantes asociados a los mismos, como por ejemplo, el menor valor de la madera ardida, la reducción del valor paisajístico, los niveles crecientes de erosión y degradación de los sistemas edáficos e hidrológicos de áreas ardidas, o la liberación de CO₂ a la atmósfera durante el incendio forestal. Por ello, y aunque es cierto que la realización de dicha gestión conlleva un gasto importante, su empleo puede suponer grandes ahorros en la lucha contra incendios y en las acciones posteriores de reforestación de áreas ardidas (Enersilva, 2007), destacando así la importancia de realizar una adecuada gestión selvícola para la persistencia de los sistemas forestales.

Además de los combustibles extraídos, resulta clave considerar la estructura de la masa que permanece en pie tras las intervenciones. Como ejemplo, la Figura 6.16 muestra la relación existente entre los valores de *CBDe* y *CBH* y las variables dasométricas de *N* y *G*, de la masa remanente, considerando una selvicultura de

claras con intensidades de 0% a 60% de G , en intervalos de 10%, planteadas en las simulaciones realizadas para cada sitio de ensayo y subparcela de poda, a partir de los datos dendrométricos obtenidos en el inventario realizado durante el invierno 2005-2006.

De forma genérica, se puede ver en las Figuras 6.16 y 6.17 cómo las masas con valores mayores de N y G tras la clara simulada ($N_{remanente}$ y $G_{remanente}$, respectivamente) presentan una mayor carga de combustible en las copas ($CBDe$ mayor), alcanzando el valor de densidad aparente de $0,037 \text{ kg/m}^3$ a una altura inferior del dosel de copas (CBH inferior). Por tanto, desde el punto de vista de la prevención de un incendio de copas, se puede apreciar la importancia de considerar también la situación de la masa remanente, siendo mayor el riesgo de incendio a mayor valor de las variables de masas comentadas ($N_{remanente}$ y $G_{remanente}$).

Comparativamente, la parcela de Barcia, de mayor edad que los otros tres rodales estudiados, y origen artificial, estando el resto de parcelas instaladas en masas naturales, mostró el mayor valor de $CBDe$. Parte de esta observación podría ser explicada, de acuerdo con el trabajo de Ruiz-González y Álvarez-González (2011), por la mayor edad del ensayo de Barcia. Por otro lado, el valor de CBH para esta parcela se mantiene en una situación intermedia, con un valor que se asemeja más al de la parcela de Valsera, siendo cuantificado un valor inferior en los otros dos sitios de ensayo. Los menores valores obtenidos en dichos ensayos podrían deberse a la menor edad y menor tamaño de los árboles de dichas parcelas, con una distribución de la copa más cercana al suelo, lo que conlleva a alcanzar la densidad aparente de $0,037 \text{ kg/m}^3$, definida en este trabajo para la determinación de CBH , a una altura inferior.

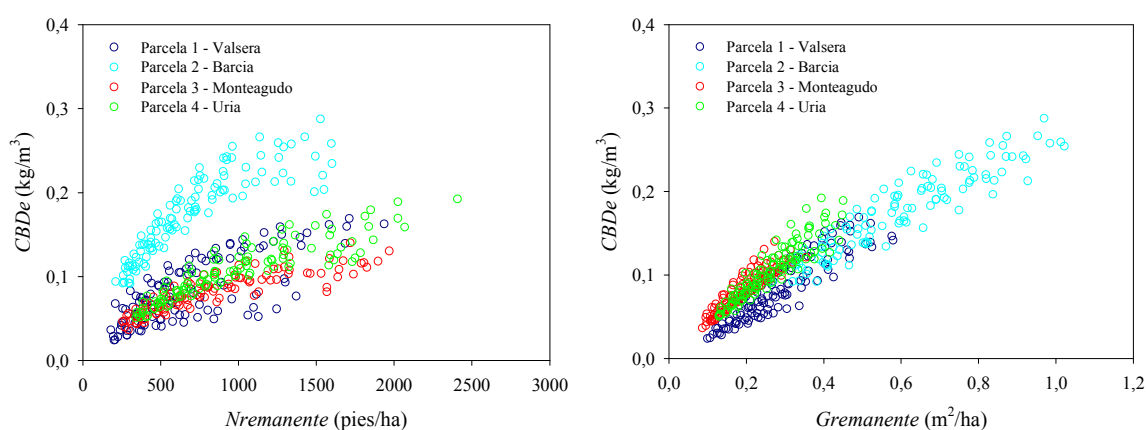


Figura 6.16. Variable $CBDe$ en función de la densidad remanente ($N_{remanente}$, pies/ha) (izquierda) y el área basimétrica remanente ($G_{remanente}$, m^2/ha) (derecha) de las cuatro parcelas permanentes de ensayo de *Pinus pinaster*, para simulaciones de clara por lo bajo con intensidades de 10% en 10% (de 0% a 60% de G eliminada).

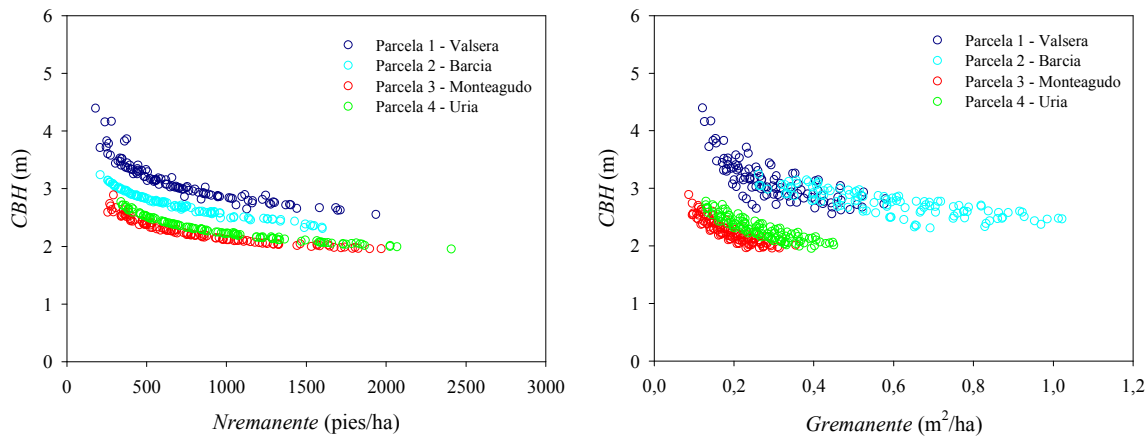


Figura 6.17. Variable *CBH* en función de la densidad remanente (*Nremanente*, pies/ha) (izquierda) y el área basimétrica remanente (*Gremanente*, m²/ha) (derecha) de las cuatro parcelas permanentes de ensayo de *Pinus pinaster*, para simulaciones de clara por lo bajo con intensidades de 10% en 10% (de 0% a 60% de *G* eliminada).

Por último, a pesar de que en este trabajo no se ha podido considerar la humedad de los combustibles, tal y como indican Ruiz-González *et al.* (2009), la cuantificación de este parámetro, principalmente para los combustibles finos, resulta de gran importancia para la determinación del riesgo de incendio y para el mayor entendimiento del comportamiento del fuego. De acuerdo con estos autores, la probabilidad de inicio de un incendio es mayor cuanto más secos estén los combustibles finos en el monte. Una vez iniciado el fuego, la humedad presenta un papel nuevamente clave en la propagación del incendio. Dado que el cálculo directo de dicha humedad no es de utilidad práctica, por no poder ser realizado con suficiente rapidez, Ruiz-González *et al.* (2009), desarrollaron modelos de predicción de la humedad del combustible fino a partir de variables ambientales de fácil medición en monte, siendo necesario por tanto la realización de este tipo de trabajo para la especie y tipología de masa empleados en el presente estudio, lo que permitiría el mayor conocimiento del comportamiento del fuego en las masas de *Pinus pinaster* del ámbito atlántico.

En cualquier caso, parte de la información recogida en este apartado se corresponde con valores simulados, y estimaciones realizadas a partir de ecuaciones de biomasa con carácter estático, que no han considerado la influencia de la silvicultura en la producción de biomasa, lo que implica la necesidad de verificar los resultados presentados con estudios empíricos que permitan aportar valores más precisos, estimados a partir de situaciones reales. Aun así, es importante destacar que las simulaciones realizadas en este trabajo ayudan a entender mejor la influencia de la gestión selvícola de podas y claras en el comportamiento de un incendio forestal, información de gran importancia para la gestión y persistencia de las masas de *Pinus pinaster* del noroeste peninsular, dada la frecuencia de estos eventos y la escasa silvicultura preventiva aplicada hasta el momento en esta zona del territorio

peninsular. En suma, esto resulta de especial interés para *Pinus pinaster*, dada la tendencia de la especie a sufrir incendios de copas de gran intensidad cuando no se aplica en sus masas una gestión de los combustibles adecuada (p.e. Burrows *et al.* (2000) en Australia; Ferreira y Galante (2003) y Fernandes *et al.* (2004) en Portugal). Se espera, por tanto, que el mayor conocimiento sobre la gestión selvícola y el riesgo de incendio en estudios posteriores permita un cambio en la gestión de las masas de *Pinus pinaster*, asegurando una mayor protección de la especie frente al fuego y obteniendo un producto de mejor calidad maderera.

6.3.3.3. Ajuste y modelización de la función de densidad de Weibull

Una vez obtenidos los perfiles de densidad aparente de combustibles finos de la copa de las cuatro parcelas permanentes de ensayo de podas y claras del SERIDA, para la situación real, anterior y posterior a la poda, se ajustó la función de densidad de Weibull de dos parámetros para cada subparcela de ensayo (64 para cada inventario) e inventario, antes y después de la poda.

En la Tabla 6.19 figuran los valores medios y la desviación estándar de los parámetros b y c de dicha función de densidad. Para el análisis de varianza realizado se consideraron poda (tres niveles) y parcela (4 parcelas) como factores fijos y subparcela (64 subparcelas) como factor aleatorio.

Los resultados del análisis de varianza realizado mostraron la existencia de diferencias significativas entre los valores de los parámetros en función del tratamiento realizado e inventario. Para el parámetro c las diferencias entre los tratamientos de poda del 20% y 40% fueron significativas para los dos últimos inventarios (inviernos 2008-2009 y 2010-2011). En cambio, estos tratamientos no mostraron diferencias con el control en dichos inventarios. El parámetro b mostró diferencias tan solo para el segundo y cuarto inventario (inviernos 2005-2006 y 2010-2011, ambos después de poda).

Tabla 6.19. Valores medios y desviación estándar (entre paréntesis) de los parámetros b y c de la función de densidad de Weibull ajustada por mínimos cuadrados a las distribuciones verticales de densidad aparente de cada subparcela de poda, para la situación real inventariada en los ensayos permanentes de *Pinus pinaster*. Distintas letras indican diferencias significativas en el test de comparación de medias de Tukey ($\alpha = 95\%$).

<i>Intensidad poda diseñada</i>	<i>Parámetro b</i>	<i>Parámetro c</i>
<i>Inv 0 (invierno 2005-2006) - Antes de poda</i>		
0	3,7030 (0,6297) ^a	3,5392 (0,1542) ^a
20	3,6930 (0,6143) ^a	3,5267 (0,1417) ^a
40	3,7149 (0,6322) ^a	3,5020 (0,1503) ^a

Tabla 6.19 (continuación). Valores medios y desviación estándar (entre paréntesis) de los parámetros b y c de la función de densidad de Weibull ajustada por mínimos cuadrados a las distribuciones verticales de densidad aparente de cada subparcela de poda, para la situación real inventariada en los ensayos permanentes de *Pinus pinaster*. Distintas letras indican diferencias significativas en el test de comparación de medias de Tukey ($\alpha = 95\%$).

<i>Intensidad poda diseñada</i>	<i>Parámetro b</i>	<i>Parámetro c</i>
<i>Inv 1 (invierno 2005-2006) - Después de poda</i>		
0	3,7308 (0,6386) ^b	3,6659 (0,1867) ^a
20	3,8118 (0,6584) ^b	3,9974 (0,2422) ^a
40	3,9750 (0,7283) ^a	4,4001 (0,2908) ^a
<i>Inv 2 (invierno 2008-2009) - Después de poda</i>		
0	5,1076 (0,6151) ^a	3,3475 (0,2677) ^{ab}
20	5,1875 (0,6001) ^a	3,3392 (0,3325) ^b
40	5,2865 (0,6030) ^a	3,4770 (0,3483) ^a
<i>Inv 3 (invierno 2010-2011) - Después de poda</i>		
0	6,2418 (0,7214) ^c	3,0729 (0,2344) ^{ab}
20	6,4567 (0,7566) ^b	3,0510 (0,3387) ^b
40	6,6426 (0,7525) ^a	3,1526 (0,3602) ^a

donde *Intensidad poda diseñada* es la intensidad del tratamiento planteado en el diseño experimental (ver apartado 2.2, capítulo 2), expresada en % de $L_{copa,y}$ a eliminar; *Inv* es el código de inventario; y parámetros b y c son los parámetros de la función de Weibull.

El siguiente paso fue ajustar ecuaciones que relacionen los parámetros de la función de densidad de Weibull con variables de rodal sencillas de medir en campo. El ajuste lineal, empleando el procedimiento de selección de variables independientes “*stepwise*”, puso de manifiesto que los parámetros b y c mostraban una relación lineal con diferentes variables de masa, siendo seleccionadas finalmente la longitud de copa media (L_{copam}) y la altura media (h_m), para ambos parámetros, además de la densidad (N) para el modelo de estimación del parámetro c .

En la Tabla 6.20 se muestran los modelos finalmente obtenidos junto con el valor de los estadísticos de bondad de ajuste ($REMC$ y R^2_{adj}). Estas ecuaciones incluyen variables dasométricas que permiten recoger la influencia de intervenciones selvícolas que afectan tanto a la densidad de los árboles como a las copas de los mismos, lo que resulta de gran importancia para masas gestionadas mediante podas y claras.

Tabla 6.20. Modelos y estadísticos de bondad de ajuste de los mismos, para los parámetros b y c de la función de densidad de Weibull ajustada por mínimos cuadrados a las distribuciones verticales de densidad aparente de cada subparcela de poda de la red experimental de parcelas permanentes de *Pinus pinaster*.

Parámetro	Modelo	REMC	R^2_{adj}
b	$b = \alpha_1 + \beta_1 \cdot L_{copam} + \gamma_1 \cdot h_m$	0,1865	0,9797
c	$c = \alpha_2 + \beta_2 \cdot L_{copam} + \gamma_2 \cdot h_m + \theta_2 \cdot N$	0,2914	0,5860

donde b y c son los parámetros de la función de densidad de Weibull; α_i , β_i , γ_i y θ_i son los parámetros a estimar; L_{copam} es la longitud de copa media, en m; h_m es la altura media, en m; N es la densidad, en pies/ha; $REMC$ es la raíz cuadrada del error medio cuadrático; y R^2_{adj} es el coeficiente de determinación ajustado.

En la Tabla 6.21 se muestran los parámetros estimados en el ajuste, para cada uno de los modelos definidos.

Tabla 6.21. Parámetros estimados en el ajuste de los modelos construidos para la determinación de los parámetros de la función de Weibull, para la caracterización de la distribución vertical de los combustibles finos en el dosel de copas de rodales regulares de *Pinus pinaster*.

Variable modelizada	Parámetro	Estimación	Error estándar asintótico	t Valor	Prob> t
Parámetro b	α_1	0,09550	0,04400	2,17	0,0309
	β_1	-0,20391	0,01955	-10,43	<0,0001
	γ_1	0,88714	0,01708	51,95	<0,0001
Parámetro c	α_2	4,78800	0,14936	31,86	<0,0001
	β_2	0,12721	0,02686	4,74	<0,0001
	γ_2	-0,35595	0,03055	-11,65	<0,0001
	θ_2	-0,000169	0,00007235	-2,34	0,0200

donde Prob>|t| es el valor de significación de cada parámetro estimado; α_i , β_i , γ_i y θ_i son los parámetros estimados para la determinación de los parámetros de la función de Weibull.

El modelo definido para el parámetro b logró explicar un porcentaje muy alto de la variabilidad observada (cerca del 98%), pero en el caso de parámetro c la variabilidad explicada por el modelo fue de aproximadamente un 59%. Este resultado pone de manifiesto la dificultad de modelización de este parámetro, que ya se ha observado con anterioridad en otros trabajos en los que se ha tratado de utilizar la función de densidad de Weibull con variables como los diámetros o las secciones normales (p.e. Álvarez-González *et al.*, 2002; García-Güemes *et al.*, 2002).

A partir de las funciones definidas para los parámetros b y c , fueron estimados sus valores para cada subparcela de ensayo e inventario, antes y después de la poda. Una vez hecho esto, fueron comparadas las distribuciones verticales de densidad aparente observadas con las estimadas por la función de Weibull modelizada. Pese a la menor

fiabilidad del modelo obtenido para el parámetro c , los resultados del test de bondad del ajuste de Kolmogorov-Smirnov con un nivel de significación del 20% no mostraron diferencias entre las distribuciones observadas y las modelizadas para las subparcelas de poda definidas, a excepción de una de ellas, que no pasó dicho test para el inventario realizado en el invierno 2008-2009.

Por tanto, y de acuerdo con los resultados obtenidos, el empleo de la función de densidad de Weibull para modelizar las distribuciones de densidad aparente de combustibles finos, en masas jóvenes regulares de *Pinus pinaster* en Asturias, podría ser una alternativa válida a los métodos de estimación directa de la densidad aparente de los combustibles finos del rodal (CBD), y las variables $CBDe$ y CBH a partir de ecuaciones ajustadas, que relacionan estos valores con variables sencillas de medir en campo. Asimismo, la obtención del perfil completo de densidad aparente presenta la ventaja de poder utilizar dicho perfil para la estimación de los valores de $CBDe$ y, sobre todo CBH para cualquiera de las definiciones publicadas hasta el momento (sea o no el valor de densidad aparente de $0,037 \text{ kg/m}^3$ adoptado en el presente estudio, de acuerdo con el criterio de Sando y Wick (1972)), aportando una flexibilidad muy importante a los resultados obtenidos, que pueden ser comparados con distintos trabajos para los que se haya empleado un criterio diferente de la definición de CBH .

Autores como Keane *et al.* (2005) destacan la importancia de cuantificar las características del dosel de copas para la evaluación del riesgo de un incendio de copas, la priorización de los tratamientos a realizar en las masas forestales y el diseño de tratamientos que permitan reducir el potencial de inicio y propagación de un incendio de copas. Esto adquiere especial interés para las masas de coníferas del noroeste peninsular, por la frecuencia de incendios en este tipo de masas y por la falta de información suficiente sobre la estructura de la masa y su relación con el comportamiento del fuego. Entre los pocos trabajos realizados en esta temática destacan los de Crecente-Campo *et al.* (2009), para masas de *Pinus sylvestris*, López-Sánchez y Rodríguez-Soalleiro (2009), para *Pseudotsuga menziesii*, y Ruiz-González y Álvarez-González (2011) para *Pinus radiata*. Los dos primeros estudios desarrollaron una ecuación para predecir CBD a partir de las variables de masa área basimétrica (G) y densidad (N), de acuerdo con el trabajo de Cruz *et al.* (2003b). En el trabajo de López-Sánchez y Rodríguez-Soalleiro (2009), además, el modelo de predicción de CBD fue incorporado dentro de un diagrama de manejo de la densidad ($SDMD$), con el fin de poder plantear diferentes esquemas de claras considerando, entre otras variables, CBD . Este tipo de ecuaciones resulta de gran utilidad por facilitar la estimación de CBD a partir de variables del rodal. Sin embargo, en ambos estudios no se desarrolló ninguna ecuación de predicción para CBH , variable de gran importancia para el análisis del riesgo de inicio de un incendio de copas. Ruiz-González y Álvarez-González (2011), en cambio, sí desarrollaron un modelo para

dicha variable. Concretamente, ambos autores definieron una ecuación para estimar el valor de $CBDe$, a partir de G y la altura dominante (H_0), y otra ecuación para determinar CBH a partir de H_0 . La metodología empleada en este trabajo, utilizada también por otros autores como Reinhardt y Crookston (2003), presenta la limitación de estimar $CBDe$ a partir de modelos de copa, ecuaciones que, tal y como comentan Keane *et al.* (2005), no están definidas para todas las especies, tamaños o condiciones de sitio, limitando su uso a situaciones en las que existan modelos de copa para la especie y condiciones de crecimiento deseados. Por otra parte, la mayoría de las ecuaciones de CBD y CBH han sido construidas a partir de variables de masa que se encuentran más relacionadas con la gestión de la densidad de la masa y no tanto con las intervenciones selvícolas que intervengan en la copa de los árboles, como es el caso de las podas.

La estimación de estas variables estructurales de masa, CBD y CBH , permitirá además utilizar modelos de simulación que ayuden en la predicción del riesgo de un fuego de copas, entre los que destacan Behave Plus 3.0.1. o sus derivados: (NEXUS, FARSITE, “Fuel Management Analyst”, etc.). Este tipo de modelos pueden ser herramientas de gran utilidad como apoyo a la toma de decisiones para la gestión de los combustibles mediante una selvicultura preventiva, siendo sin embargo necesario el desarrollo de modelos adaptados a las condiciones climáticas y tipos de combustibles de la Península Ibérica, ya que todos estos simuladores han sido desarrollados en países como Canadá y Estados Unidos, empleando por tanto otro tipo de escenarios de ecosistemas y gestión.

Por último, se debe recordar que las ecuaciones desarrolladas en este trabajo para la estimación de los parámetros de la función de densidad de Weibull, deberán ser utilizadas tan solo en rodales de *Pinus pinaster* de Asturias cuyas características sean similares a las de las parcelas estudiadas en el presente trabajo.

6.4. Conclusiones

El sistema de ecuaciones definido en el presente trabajo para la estimación de la biomasa de árboles jóvenes de *Pinus pinaster*, mediante ecuaciones alométricas para los modelos de biomasa total del fuste y de la copa, y mediante la función de distribución de Weibull, para la biomasa de copa hasta una altura límite, mostró unos resultados de ajuste satisfactorios. En este sistema se ha considerado la ponderación de las ecuaciones de madera y corteza, lo que permitió corregir la heterocedasticidad de la varianza presente en el análisis inicial de dichas fracciones. Asimismo, se ha modelizado el término del error con una estructura autorregresiva de primer orden (AR(1)) en las ecuaciones de biomasa de ramas y finos de la copa, lo que permitió corregir la posible correlación entre observaciones.

El diámetro normal fue la mejor variable regresora para estimar la biomasa de las diferentes fracciones arbóreas consideradas. Al incluir la altura total del árbol mejoró la precisión de la ecuación de las fracciones de madera y corteza. En el caso de la estimación de los componentes de copa (agrupados en ramas y finos) los mejores ajustes resultaron al considerar variables de copa junto con el diámetro normal, siendo el ratio de copa la variable seleccionada, la cual muestra a su vez una buena relación con la selvicultura aplicada.

El ajuste simultáneo de las ecuaciones fue realizado mediante el procedimiento de máxima verosimilitud con información completa ("*Full Information Maximum Likelihood*", FIML), lo que permitió optimizar las predicciones de la biomasa arbórea de las fracciones consideradas para el árbol completo y por alturas.

Los modelos de biomasa de madera y corteza ajustados para el árbol completo explicaron cerca del 96% de la variabilidad de los datos observados. La precisión de las estimaciones de las fracciones de copa para el árbol completo fue menor, explicando un 84% para las ramas de la copa y un 69% para los finos. Los modelos obtenidos para la estimación de dichas fracciones de copa hasta una altura determinada, sin embargo, explicaron el 96% y 95% de la variabilidad de los datos, para ramas y finos de la copa, respectivamente.

Este tipo de ecuaciones presentan la ventaja de poder estimar la biomasa existente en el árbol completo, o en una porción del mismo, siendo por ello una herramienta de gran utilidad para la estimación de la biomasa a extraer en actividades de podas y/o claras. Sin embargo, se trata de ecuaciones que permiten cuantificar dicha biomasa para un momento determinado, antes o después de las intervenciones comentadas, siendo necesario efectuar nuevos muestreos para la definición de ecuaciones más dinámicas, que permitan cuantificar el efecto de la selvicultura aplicada en la biomasa arbórea. Por otra parte, es importante destacar que las ecuaciones de biomasa arbórea definidas en el presente estudio deberán ser empleadas tan solo dentro del rango de datos utilizado para su estimación. Para poder emplear estas funciones en rodales de la misma especie localizados en otro rango de sitios o edades, diferente al empleado en el presente estudio, se requiere comprobar si las funciones son aplicables a otra zona mediante un muestreo de comprobación o validación.

Las ecuaciones estimadas para el árbol completo, de aplicación en masas jóvenes, podrían complementar las definidas previamente por Balboa (2005) y Cámara-Obregón (2006) para esta misma especie en masas más adultas del noroeste peninsular. También podría considerarse la elaboración de unas nuevas ecuaciones a partir del conjunto total de datos (masas jóvenes y adultas de Asturias y Galicia), para aumentar el rango de aplicación de las mismas.

Con el tamaño de muestra empleado no se pudo estimar con precisión la biomasa correspondiente a las dos fracciones de ramillas planteadas inicialmente (0-0,3 cm y 0,3-0,6 cm), teniendo que considerar para el ajuste de las ecuaciones de biomasa una única fracción de 0-0,6 cm. Por ello, sería necesario continuar con este tipo de ensayos, ampliando el tamaño de la submuestras de estas fracciones tan finas, para determinar si se pueden obtener ecuaciones fiables con un mayor número de datos o si es el pequeño tamaño de las fracciones el que dificulta su ajuste, lo que podría llevar a descartar el ajuste de modelos para esta fracción. Por tanto, es importante solucionar esta cuestión puesto que el considerar dichos componentes en el inventario hace que el trabajo de campo y laboratorio sea mucho más laborioso y de mayor coste económico.

En la muestra empleada en este estudio, la madera fue la fracción arbórea más representada (53,7%), seguida de las acículas (16,1%), la corteza (14,3%), las ramas finas de 0,6-2 cm (10,1%), las ramillas de 0,3-0,6 cm (3,9%), las ramas gruesas de 2-7 cm (1,4%) y las ramillas hasta 0,3 cm (0,3%).

La distribución de las fracciones del fuste en función del diámetro del árbol, fue diferente para madera y corteza, con una tendencia ascendente para la madera y casi constante para la corteza. Las fracciones de la copa mostraron una menor representación en el árbol a mayor diámetro de éste, a excepción de las ramas gruesas, que estuvieron presentes en mayor proporción para los árboles de mayor grosor.

La función de distribución de Weibull, ajustada para la muestra de árboles empleada en el presente estudio, permitió definir el patrón de distribución vertical de la biomasa de copa. Dicho patrón, fue muy similar para las fracciones de ramas y ramillas, siendo lo más destacable la diferente disposición de la biomasa foliar, cuya distribución estuvo desplazada hacia la parte media y superior de la copa, lo que podría ser una indicación de la competencia a la que se encuentran sometidas las masas estudiadas. La mayor cantidad de biomasa de las ramas estuvo localizada en la parte media e inferior de la copa (30-60% inferior de la longitud de copa), mientras que la mayor cantidad de biomasa foliar se encontró situada entre la mitad y el tercio superior de la copa (50% al 70% inferior de la longitud de copa). Este patrón se mantuvo al diferenciar los árboles por tamaños, siendo inferior la cantidad de biomasa de ramas y acículas de la copa para los árboles de menor tamaño. De acuerdo con todo lo anterior, la realización de actividades de poda con intensidades de hasta el 40-50% de la L_{copa} , no parece suponer, *a priori*, un efecto negativo para el crecimiento y desarrollo posterior de los árboles podados. Podas más intensas, supondrían una eliminación más significativa de biomasa de ramas y acículas, siendo aun así la fracción de acículas la menos afectada.

La biomasa de ramas, incluyendo acículas, mostró una relación positiva con el diámetro de la rama, por lo que la poda de ramas más gruesas generará una mayor cantidad de biomasa residual, con el consiguiente efecto que esto puede suponer para el sistema forestal. Las ramas secas o muertas mostraron la misma tendencia que las ramas vivas, con valores inferiores de biomasa y del diámetro de la rama para las primeras.

El contenido nutricional de la fracción de madera mostró los menores valores de los macronutrientes analizados, en comparación con el resto de los componentes arbóreos. La corteza, en cambio, presentó niveles importantes de los diferentes macronutrientes. Por otra parte, las fracciones de la copa mostraron acumular una cantidad importante de nutrientes, destacando el contenido nutricional de la biomasa foliar (especialmente de nitrógeno, potasio y magnesio), conformando a esta fracción un papel destacado en la dinámica de nutrientes del sistema. El único elemento que estuvo presente en un nivel crítico en la submuestra de acículas analizada, de acuerdo con los valores propuestos por Bará (1991) y Bonneau (1995) para la fracción de acículas de *Pinus pinaster*, fue el fósforo, siendo deficientes los niveles registrados de nitrógeno y potasio. La proporción de micronutrientes en los elementos arbóreos fue relativamente diferente, estando más de la mitad de dichos elementos acumulados en las fracciones de la copa, en las que tan solo cabe destacar para la fracción de acículas el contenido de boro y manganeso. La limitada muestra analizada para este estudio hace necesario ampliar la base de datos utilizada para este análisis de cara a la obtención de valores más concluyentes. En cualquier caso, queda claro que la reincorporación de los restos de corta y poda (corteza, ramas y acículas) al terreno permitiría recuperar buena parte de los elementos nutricionales acumulados en los árboles tratados.

La estimación de la biomasa y del contenido de C extraídos en la poda efectuada en las parcelas de ensayo de *Pinus pinaster* empleadas a lo largo de la presente tesis mostró, a nivel de masa, una baja reducción de ambas variables (aproximadamente 3-6 t/ha de biomasa y 1-4 t/ha de carbono). Considerando la proporción de biomasa extraída, para los tratamientos de poda más débiles (15%) se realizó una extracción de finos de la copa del 5% y de biomasa de ramas del 10%, mientras que la poda más fuerte (45%) implicó la eliminación del 46% de los elementos finos y el 68% de las ramas, siendo extraídos para el conjunto de tratamientos, sin diferenciar su intensidad, el 35% de los elementos finos y el 50% de las ramas. Aunque no se trata de reducciones a nivel de masa (t/ha) elevadas, dado el bajo peso de este tipo de fracciones, el porcentaje de copa extraído resultó más significativo, siendo por ello recomendable reincorporar dicha biomasa al sistema. Para el caso concreto estudiado en este trabajo, la incorporación de la biomasa extraída en tratamientos de poda con severidades del 15%, 30% y 45% de altura eliminada supondría una reincorporación del 3%, 11% y 20% de la biomasa aérea total. Por tanto, el impacto

de la poda en el sistema forestal en su conjunto dependerá, en gran medida, de la gestión efectuada con los restos de los tratamientos. Podas más intensas y de árboles de mayor tamaño aportarán al suelo una mayor cantidad de biomasa de la copa.

La metodología presentada en este trabajo para la estimación de los valores de *CBDe* y *CBH* a partir del perfil de distribución vertical de la densidad aparente de los combustibles finos disponibles (*CBD*), utilizando las ecuaciones de estimación de biomasa hasta una altura límite, para dicha fracción arbórea, ha mostrado un buen comportamiento. Este procedimiento, además, permite obtener una estimación más precisa de la cantidad de combustibles finos disponibles en cada sección de la copa, que en el caso de asumir una distribución uniforme de la biomasa en toda la longitud de la copa o que la biomasa fina se distribuye verticalmente de acuerdo con la distribución del volumen de la copa. Asimismo, el empleo de ecuaciones de biomasa hasta una altura relativa ha mostrado simplificar el cálculo de las variables estructurales *CBDe* y *CBH*, cuyos valores no se pueden medir directamente, y cuya determinación sirve de ayuda para definir la potencialidad de una masa para sufrir fuegos de copa.

Los cambios estructurales introducidos en los combustibles de una masa forestal, a través de la selvicultura, pueden modificar el comportamiento del fuego. Asimismo, la modificación de la estructura de la masa y, por consiguiente, del valor de *CBDe* y *CBH*, resulta diferente en función del tipo de intervención y la intensidad del tratamiento. Por lo general, la poda tuvo un menor efecto en la modificación del valor del *CBDe*, siendo mayor su influencia sobre la variable *CBH*. Para la situación simulada, por ejemplo, no se mostró una reducción de *CBDe* hasta intensidades de poda del 50% de longitud de copa eliminada, siendo significativa dicha reducción a partir de intensidades del 60%. La clara por lo bajo simulada tuvo un mayor efecto en la modificación del *CBDe*, con reducciones significativas de dicha variable a partir de intensidades de clara del 20% del área basimétrica extraída. Por otra parte, la realización conjunta de podas y claras mostró ser efectiva en la reducción del *CBDe* para cualquier tipo de intensidad de poda combinada con claras de al menos ese 20%. La poda simulada mostró un aumento significativo de *CBH* para intensidades de poda del 30%, mientras que la clara por lo bajo no consiguió un incremento de esta variable hasta intensidades de al menos el 40%. Por otro lado, los resultados obtenidos en las simulaciones de una gestión conjunta de podas y claras mostraron un mayor valor de *CBH* para intervenciones de clara por lo bajo, de intensidad débil (10-20% de área basimétrica), siempre y cuando la poda eliminase al menos el 30% de la longitud de la copa. La realización de ambos tratamientos selvícolas, por lo tanto, supuso el incremento de los umbrales críticos para la iniciación y la propagación del fuego por las copas, implicando la necesidad de mayores velocidades del viento y/o menores humedades de los combustibles tanto muertos como vivos para que una masa pueda desarrollar un fuego de copas en

alguna de sus tipologías. De todas las simulaciones planteadas, el tratamiento más efectivo para la prevención de un incendio fue la clara del 60% combinada con la poda del 60%, con una reducción de un 64% para el valor de *CBDe* y un incremento del 140% para el valor de *CBH*, en relación con el control.

Para los cálculos de la intensidad lineal crítica y de la velocidad de propagación, se consideraron unas condiciones climáticas, topográficas y de humedad de los combustibles constantes. Unido a esto, no se ha realizado una evaluación sobre cómo los tratamientos de poda y/o clara afectan a las características del complejo de superficie y por tanto al comportamiento del fuego en dicha fase, ni tampoco se ha analizado en detalle la influencia de la vegetación existente en dicho estrato superficial. Por ello, se puede interpretar que el estudio presentado aborda solo parcialmente el análisis de la potencialidad de las masas para desarrollar un fuego de copas, siendo necesario realizar un estudio más detallado sobre los efectos de las intervenciones selvícolas, desde el punto de vista del riesgo de incendio (p.e. mayor carga de combustible en el estrato superficial, apertura de la masa con un incremento en el combustible de sotobosque y una variación en la humedad de los combustibles, así como la modificación en la circulación del viento por debajo del dosel de copas).

La caracterización de la masa remanente resulta también de interés para la gestión más adecuada de la misma de cara a la prevención de un incendio forestal. Mayores valores de la densidad y área basimétrica remanentes suponen un mayor valor de *CBDe* y un menor valor de *CBH*, aportando así una mayor potencialidad a la masa para sufrir un fuego de copas.

La función de densidad de Weibull mostró también un buen comportamiento para modelizar la distribución de la densidad aparente (kg/m^3), bajo diferentes escenarios selvícolas (podas y claras), en masas regulares jóvenes de *Pinus pinaster* en Asturias. La estimación de los parámetros *b* y *c* de dicha función, a partir de variables de rodal, permitió determinar el valor de la variable *CBDe*, para las fracciones de biomasa fina, y *CBH*, para diferentes criterios de densidad aparente, a partir del perfil de densidad aparente definido mediante la ecuación de *CBD* definida. El empleo de este perfil en su totalidad tiene la ventaja de estimar las variables *CBDe* y *CBH* del rodal con una gran flexibilidad, de gran importancia para ésta última, al no existir consenso sobre el criterio más adecuado para su determinación.

Para el estudio llevado a cabo en este capítulo ha sido empleada una muestra de 28 árboles jóvenes de *Pinus pinaster*. Este tamaño muestral no es el más adecuado para considerar el rango de condiciones en que se encuentra la especie en la provincia asturiana. Por ello, resulta necesario continuar el trabajo aquí iniciado, con una mayor variabilidad de masas (edad, selvicultura, procedencias, origen, calidad de sitio, etc.), lo que permitiría aumentar el tamaño de la muestra y mejorar los

resultados presentados en este trabajo. Hasta entonces, y dada la escasa información existente a día de hoy sobre el efecto de los tratamientos selvícolas, especialmente la poda, en masas jóvenes regulares de *Pinus pinaster* del ámbito atlántico, en relación con la producción y distribución de la biomasa, el contenido de nutrientes y de carbono, o la ocurrencia y comportamiento del fuego, los resultados aquí presentados permiten aportar una primera aproximación sobre esta temática. La continuación de esta línea de trabajo debería llevarse a cabo no solo para *Pinus pinaster*, sino también para otras especies productoras como *Pinus radiata*, en las que la realización de una selvicultura intensiva de podas y claras supone la gestión constante de la biomasa forestal, con la consiguiente necesidad de ampliar el conocimiento sobre el impacto que dicha gestión tiene sobre el sistema, aportando así una información de gran valor para una gestión en la que se consideren tanto criterios productivos como de conservación de la masa.



CAPÍTULO 7

**Conclusiones generales y líneas futuras de
investigación – General conclusions and
future lines of research**

CONCLUSIONES GENERALES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN – GENERAL CONCLUSIONS AND FUTURE LINES OF RESEARCH

7.1. Conclusiones generales

Las principales conclusiones alcanzadas en la presente tesis doctoral son las siguientes:

1. La realización de una poda óptima en masas jóvenes de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* requiere seleccionar el momento más adecuado para su ejecución, atendiendo principalmente al tamaño de los árboles (diámetro normal, longitud de copa y diámetro de las ramas), su estatus social y la competencia a la que están sometidos, para minimizar así el efecto de la poda sobre el crecimiento y producción de los árboles intervenidos y asegurar una cicatrización más rápida de las heridas.
2. La valoración de la intensidad real de poda en función de la altura relativa del árbol podado, resulta un criterio más adecuado para el estudio del efecto de la poda, especialmente en masas establecidas en las que el origen del material no es conocido.
3. Los árboles a seleccionar deberán ser pies con buenos crecimientos, dominantes o codominantes, y la poda efectuada deberá evitar realizar una reducción excesiva de la longitud de copa. No se recomienda utilizar la edad o la altura del árbol como criterio del momento de intervención. El diámetro normal del árbol es la variable más adecuada, no debiendo podar árboles con pequeño diámetro, por su influencia en el crecimiento, o diámetro excesivo, por el mayor tamaño del centro con defectos, siendo el rango de diámetro normal del árbol de 8-12 cm el establecido como recomendable.
4. La adopción de estos criterios en la poda de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* permite minimizar el diámetro sobre muñón máximo (DSM_m) de cara a maximizar la producción de madera libre de nudos con un menor efecto sobre el crecimiento. Un DSM_m aceptable puede ser alcanzado por podas del 45% de altura en la primera intervención de poda de árboles jóvenes de masas de ambas coníferas siempre que se mantenga el criterio de diámetro previamente establecido.

5. La estimación del DSM_m puede realizarse de forma precisa a partir del diámetro normal del árbol, de acuerdo con el modelo estimado en este trabajo.
6. Se debe facilitar el proceso de cicatrización de las heridas, recomendando la selección de árboles con ramas que no generen heridas superiores a los 3 cm de diámetro. Retrasar la poda resulta más importante en *Pinus radiata* que en *Pinus pinaster*, por el mayor valor del engrosamiento mostrado por esta especie para un mismo diámetro normal.
7. *Pinus radiata* mostró una mayor susceptibilidad en la formación de brotes epicórmicos tras la poda, con una mayor frecuencia y aparición de brotes de mayor tamaño a mayor intensidad del tratamiento, y una mayor respuesta en los árboles de menor tamaño (diámetro normal y longitud de copa). *Pinus pinaster*, en cambio, no mostró brotes epicórmicos tras la poda.
8. Las dos especies estudiadas no mostraron diferencias significativas en el perfil del centro con defectos en los años posteriores a la poda, siendo ajustado un único modelo para ambas coníferas. La determinación de una función para estimar el valor del diámetro con defectos, a partir de las funciones de perfil del fuste sin defectos, considerando el engrosamiento en función de la especie y la severidad de poda, aporta una información muy valiosa para la determinación del volumen de madera diferenciado por calidades.
9. La poda parece afectar de forma positiva en la forma del centro con defectos, dando lugar a formas más cilíndricas a mayor severidad del tratamiento (45%), lo que podría compensar el menor volumen producido en los árboles podados con mayor intensidad.
10. Los modelos desarrollados en *Pinus pinaster* para estimar la biomasa arbórea por alturas permiten determinar la cantidad de biomasa eliminada en una actividad de poda, facilitando el análisis del efecto de distintos modelos de gestión y su posible impacto en el balance nutricional, contenido de carbono o riesgo de incendio de una masa.
11. La simulación de gestión de podas combinadas con claras permite constatar su efecto sobre la reducción del riesgo de inicio y propagación de un fuego de copas, siempre que la biomasa extraída sea gestionada de forma adecuada.

7.2. Líneas futuras de investigación

En este apartado se describen algunas líneas de investigación a desarrollar como continuación al trabajo iniciado con la presente tesis doctoral.

- Análisis conjunto del efecto de las podas y claras para el desarrollo de futuras herramientas de gestión que faciliten la optimización de ambas técnicas selvícolas en masas de *Pinus radiata* y *Pinus pinaster* en Asturias.
- Seguimiento de la aparición de brotes epicórmicos en pino radiata, considerando un mayor rango de situaciones de la masa (exposición de luz, densidad de plantación, intensidad de poda), especialmente tras la segunda fase experimental de los ensayos, en donde se combinan la poda alta y la clara.
- Seguimiento de la respuesta en el crecimiento de los árboles, determinación de la conicidad y construcción de perfiles del fuste con y sin defectos en árboles de mayor edad, tras la poda alta y la clara, mediante métodos no destructivos en donde se realice una evaluación más detallada de la formación del centro con defectos.
- Estudio del efecto de las podas y las claras en la distribución y reparto de la biomasa de las fracciones de la copa remanente, y testar otras metodologías de muestreo más específicas (p.e. “*Randomized Branch Sampling*”, RBS; “*Importance Sampling*”) (Valentine *et al.*, 1984; Gregoire *et al.*, 1995b) para la estimación no sesgada de la biomasa arbórea.
- Redefinir y/o validar los modelos propuestos en la presente tesis, considerando una mayor cantidad de datos para cada tipo de estudio en ambas especies.
- Desarrollo de modelos de crecimiento incluyendo índices de competencia dependientes de la distancia, características de los anillos y variables climáticas, haciendo uso de técnicas de dendrocronología.
- Caracterización de algunas propiedades de la madera (resistencia, dureza, rigidez, densidad) en función del tratamiento de poda y clara mediante técnicas no destructivas (NDT) en árboles en pie y mediante NDT y métodos destructivos en el producto final (postes o tablas).
- Estudio destructivo para la evaluación de la nudosidad (número, tamaño y distribución de los nudos en el árbol) y del tamaño del centro con defectos, y su relación con la práctica de la poda para determinar el momento más adecuado de intervención.
- Determinación del efecto de distintos modelos de gestión sobre la clasificación visual de la calidad de la madera de los productos obtenidos tras el procesamiento industrial para uso estructural.

- Análisis de la ocurrencia y distribución de bolsas de resina en el árbol, y su relación con las intervenciones selvícolas de podas y claras, para el uso industrial de las trozas obtenidas al final del turno.

Además de las líneas anteriormente expuestas, se presentan otras líneas de interés, que complementarían la generación de conocimiento en el dispositivo experimental establecido en ambas especies.

- Evaluación conjunta del riesgo sanitario y velocidad de cicatrización comparando diferentes herramientas y épocas de poda, atendiendo al cierre de las heridas en función del tamaño y posición de la rama podada, el tamaño del árbol, la calidad del corte, la época de poda y la densidad de la masa.
- Estudio de rendimientos y costes de las intervenciones de podas y claras, analizando diferentes herramientas de poda y diferenciando el tratamiento en función de la altura alcanzada por el mismo, definiendo la mejor logística para estos esquemas selvícolas.
- Realización de modelos de biomasa total y su distribución a lo largo del tronco en *Pinus radiata*, para su aplicación en la estimación de la biomasa extraída en intervenciones de podas y/o claras y su relación con el contenido de nutrientes, carbono y riesgo de incendios.
- Caracterización de la biomasa del mantillo y del estrato arbustivo y determinación de la humedad de los combustibles del mantillo y los estratos arbustivo y arbóreo, para diferentes épocas del año, considerando los esquemas selvícolas aplicados, junto con las características climatológicas que afectan al riesgo de ocurrencia de un incendio forestal.
- Evaluación de factores edafo-climáticos y del impacto de los tratamientos de los estratos arbóreo y superficial sobre el balance nutricional y contenido de carbono del ecosistema forestal intervenido, estimando las variables ecofisiológicas más determinantes en el crecimiento del árbol para su aplicación posterior en modelos de procesos.

7.3. General conclusions

The main conclusions reached in this thesis are as follows:

1. Achieving optimal pruning in young *Pinus radiata* and *Pinus pinaster* stands requires the selection of the most appropriate time for its execution, taking into account primarily, tree size (diameter at breast height, crown length and branch diameter), their social status and the competition to which they are subjected. In this way, the effect of pruning on tree growth and yield is minimized and faster healing of pruning wounds is ensured.
2. The assessment of the real pruning intensity depending on the relative canopy height of the pruned tree is a suitable criterion for the study of the effect of pruning, especially in established stands, where the origin of the material is unknown.
3. Trees to be selected should be those with good growth, be dominant or codominant, and the pruning should avoid reducing crown length excessively. Age and tree height are not recommended as criteria for time of intervention. Diameter at breast height is the most appropriate tree variable, the recommended range being 8-12 cm: small diameter trees (< 8 cm) should not be pruned owing to the influence on growth, nor large diameter trees (> 12 cm), because of the increased size of the defect core.
4. The adoption of these criteria in the pruning of *Pinus radiata* and *Pinus pinaster* allows the minimizing of the maximum diameter over stubs (DSM_m) in order to maximize the amount of clear-wood production with the minimum effect on tree growth. An acceptable DSM_m can be achieved by pruning 45% of the height at the first intervention in young trees of both conifers as long as the previously established diameter criteria is taken into consideration.
5. The estimation of DSM_m can be performed accurately from the diameter at breast height, in accordance with the model developed in this work.
6. The process of wound healing, will be facilitated through the selection of trees with branches whose removal does not lead to wounds over 3 cm in diameter. Delaying pruning is more important in *Pinus radiata* than in *Pinus pinaster*, demonstrated by the larger values of the thickening shown by this species for the same diameter at breast height.
7. *Pinus radiata* was shown sprouting ability after pruning, with greater frequency and larger epicormic sprouts in the most intensive treatment, and the response was more marked in the smaller trees (diameter at breast height

and crown length). *Pinus pinaster*, however, showed no epicormic shoots after pruning.

8. The two species studied showed no significant difference in the profile of the knotty core during the years after pruning; a model for both conifers therefore being fitted. The determination of a function to estimate the value of the diameter with defects - using the taper equations without defects and considering the thickening depending on the species along with the pruning severity - provides valuable information for determining the volume of wood differentiated by qualities.
9. Pruning seems to positively affect the shape of the defect core with higher severity of treatment (45%) resulting in cylindrical forms which could offset the lower volume produced in these trees.
10. The models developed to estimate tree biomass by-height in *Pinus pinaster* allows the determination of the amount of biomass removed in a pruning activity, facilitating the analysis of the effect of different forest management schedules and their potential impact on the stand-level nutritional balance, carbon content or fire risk.
11. The simulation of a regime combining pruning with thinning allows the verification of its effect on reducing the risk of crown fire initiation and spread, provided that the residual biomass is managed appropriately.

7.4. Future lines of research

This section describes some potential lines of research to build on the work started in the present doctoral thesis.

- Analysis of the effect of pruning and thinning for the development of future management tools to facilitate the optimization of both techniques in *Pinus radiata* and *Pinus pinaster* stands in Asturias.
- Monitoring the development of epicormic sprouting in radiata pine considering a wider range of stand conditions (light exposure, stand density, pruning intensity), especially after the second experimental phase, which combines high pruning and thinning.
- Monitoring the growth response of the trees and determination of the taper and also the construction of taper equations with and without defects in older trees after high pruning and thinning, using nondestructive methods where a more detailed monitoring of the knotty core can be made.

- Study of the effect of pruning and thinning in the distribution and allocation of crown biomass components, and the testing of other more specific sampling methodologies (e.g., “*Randomized Branch Sampling*”, RBS, “*Importance Sampling*”) (Valentine *et al.*, 1984; Gregoire *et al.*, 1995b) for an unbiased estimation of tree biomass.
- Redefining and/or validating the models proposed in this thesis, considering a larger data sets for each kind of study in both species.
- Developing growth models incorporating distance-dependent competition indices, ring characteristics and climate variables, using dendrochronology techniques.
- Characterization of certain wood properties (strength, hardness, stiffness, density) in relation to pruning and thinning treatments using non-destructive techniques (NDT) in standing trees, and using both NDT and destructive methods in the final product (logs and boards).
- Destructive study to evaluate knottiness (number, size and distribution of knots inside the tree) and the size of the knotty core, and their relation to pruning in order to determine the optimal timing of interventions.
- Determination of the effect of different forest management schedules on the visual grading of timber quality in processed products for structural use.
- Analysis of the impact of pruning and thinning on the occurrence and distribution of resin pockets in logs destined for industry at the final cuts.

In addition to the aforementioned lines, there are additional areas of interest, which would complement the knowledge generated in the experimental network of plots of both species established.

- Assessment of the risk to forest health and time to occlusion comparing different tools and times of pruning, considering wound closure in relation to branch size and position, tree size, pruning cut quality, the time of pruning and stand density.
- Study of productivity and cost of pruning and thinning interventions analysing different pruning tools, and differing treatments depending on pruning height, thereby defining the best logistics system for these silvicultural treatments.
- Developing total biomass models and models for vertical biomass distribution in *Pinus radiata*, for use in the estimation of residual biomass obtained from pruning and/or thinning interventions and its relation to nutrient content, carbon content, and fire risk.

- Characterization of litter layer and shrub layer biomass and determining the litter, shrub and tree strata fuel moisture in different seasons of the year, considering the silvicultural systems applied as well as the climatic characteristics that affect the risk of occurrence of a wildfire.
- Evaluation of climatic and soil factors and the impact of treatments in the tree and superficial layers on the nutritional balance and carbon content of the forest ecosystem involved, estimating the main ecophysiological variables which affect tree growth for their subsequent application in process based models.



BIBLIOGRAFÍA GENERAL

BIBLIOGRAFÍA GENERAL

A

- Achim, A.; Gardiner, B.; Leban, J.-M. y Daquitaine, R. 2006. Predicting the branching properties of Sitka spruce grown in Great Britain. *New Zealand Journal of Forest Science*, 36(2/3): 246-264.
- Acosta-Mireles, M.; Vargas-Hernández, J.; Velásquez-Martínez, A. y Etchevers-Barra, J. 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia*, 36(6): 725-736.
- Adame, P.; Cañellas, I. y Del Río, M. 2010. Ingrowth model for pyrenean oak stands in north-western Spain using continuous forest inventory data. *European Journal of Forest Research*, 129(4): 669-678.
- Adams, J.W. 2005. Green weight, volume and taper equations for Virginia pine (*Pinus virginiana*) in the piedmont Region of North Carolina. Ms Thesis. NC State University. 118 pp.
- Afif, E.; Barrio-Anta, M.; Gorgoso, J.J.; Oliveira, J.A. y Cámara-Obregón, A. 2009. Factores edáficos y estado nutricional de las masas de *Pinus pinaster* Ait. en Asturias y su influencia en el índice de sitio. 5º Congreso Forestal Español. Montes y sociedad: Saber qué hacer. Ref: 5CFE01-216. Ávila, 21-25 de septiembre de 2009.
- Afif, E.; Canga, E.; Gorgoso, J.J. y Cámara, A. 2008. Influencia de los factores edáficos en el crecimiento anual en volumen y estado nutricional de *Pinus pinaster* Ait. en Asturias. V Simposio Internacional Sobre Manejo Sostenible de los Recursos forestales. SIMFOR (CD-Rom). Pinar del Río, Cuba.
- Agee, J. 1996. The influence of forest structure on fire behaviour. En: Cooper, S.L. y Redding, C.A. (Eds.). *Proceedings of the 17th Annual Forest Vegetation Management Conference*. University of California. pp. 52-68.
- Agee, J.K. y Skinner, C.N. 2005. Basic principles of forest fuel reduction treatments. *Forest Ecology and Management*, 211: 83-96.
- Aguar, A.; Almeida, M.H. y Borralho, N. 2003. Genetic Control of Growth, Wood Density and Stem Characteristics of *Pinus pinaster* in Portugal. *Silva Lusitana*, 11(2): 131-139.
- Alcalde-Olivares, C.; García-Amorena, I.; Gómez-Manzanque, F.; Maldonado-Ruiz, J.; Morla-Juaristi, C.; Postigo-Mijarra, J.M.; Rubiales-Jiménez, J.M. y Sánchez-Hernando, L.J. 2004. Nuevos datos de carbones y maderas fósiles de *Pinus pinaster* Aiton en el Holoceno de la Península Ibérica. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, Fuera de serie: 152-163.
- Alexander, M.E. 1998. Crown fire thresholds in exotic pine plantations of Australasia. Doctoral Thesis. Australian National University, Canberra, Australia.
- Alexander, M.E.; Cruz, M.G. y Lopes, A.M.G. 2006. CFIS: a software tool for simulating crown fire initiation and spread. En: Viegas, D.X. (Ed.). *Proceedings of 5th International Conference on Forest Fire Research*. Elsevier B.V. Amsterdam, The Netherlands.

- Alexander, M.E.; Stefner, C.N.; Mason, J.A.; Stocks, B.J.; Hartley, G.R.; Maffey, M.E.; Wotton, B.M.; Taylor, S.W.; Lavoie, N. y Dalrymple, G.N. 2004. Characterizing the jack pine – black spruce fuel complex of the International Crown Fire Modelling Experiment (ICFME). Can. For. Serv. Inf. Rep. NOR-X-393.
- Alía, R.; Alba, N.; Agúndez, D. e Iglesias, S. (coord.). 2005. Manual para la comercialización y producción de semillas y plantas forestales. Materiales de base y de reproducción. Serie Forestal. DGB. Madrid. 384 pp.
- Alía, R.; Gil, L. y Pardos, J.A. 1995. Performance of 43 *Pinus pinaster* provenances on 5 locations in Central Spain. *Silvae Genetica*, 44: 75-81.
- Alía, R. y Martín, S. 2003. EUFORGEN Technical Guidelines for genetic conservation and use for Maritime pine (*Pinus pinaster*). International Plant Genetic Resources Institute, Rome, Italy. 6 pp. Disponible en [Consultado, 28/07/2009]: <http://www.biodiversityinternational.org/fileadmin/biodiversity/publications/pdfs/857.pdf>.
- Alía, R.; Martín, S.; De Miguel, J.; Galera, R.; Agúndez, D.; Gordo, J.; Salvador, L.; Catalán, G. y Gil, L. 1996. Regiones de procedencia de *Pinus pinaster* Aiton. Organismo Autónomo de Parques Nacionales. Madrid. 75 pp. + 28 fichas.
- Alía, R.; Moro, J. y Denis, J.B. 2001. Ensayos de procedencias de *Pinus pinaster* Ait. en el centro de España: resultados a la edad de 32 años. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 10(2): 333-354.
- Alonso, E.; Asín, J. y Pascual, J. 2005. Biomasa residual forestal: Regresiones para las especies del género *Pinus* existentes en la provincia de Teruel. Comunicación, IV Congreso Forestal Español, Zaragoza, 26-30 de septiembre de 2005. Mesa temática 5.
- Álvarez-Álvarez, P.; Afif, E.; Cámara-Obregón, A. y Castedo-Dorado, F. 2011. Effects of foliar nutrients and environmental factor son site productivity in *Pinus pinaster* Ait. stands in Asturias (NW Spain). *Annals of Forest Science*, 68: 497-509.
- Álvarez-González, J.G. 1997. Análisis y caracterización de las distribuciones diamétricas de *Pinus pinaster* Ait. en Galicia. Tesis doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Universidad Politécnica de Madrid. 270 pp.
- Álvarez-González, J.G.; Barrio-Anta, M.; Rodríguez-Soalleiro, R. y Ruiz-González, A.D. 2005. Ecoregional site index models for *Pinus pinaster* in Galicia (northwestern Spain). *Annals of Forest Science*, 62: 115-127.
- Álvarez-González, J.G.; Rodríguez-Soalleiro, R. y Vega, G. 1999. Elaboración de un modelo de crecimiento dinámico para rodales regulares de *Pinus pinaster* Ait. en Galicia. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 8(2): 319-334.
- Álvarez-González, J.G. y Ruiz-González, A.D. 1995. Dasometría. Introducción a las técnicas de modelización forestal. Universidad de Santiago de Compostela. 83 pp.
- Álvarez-González, J.G.; Schröder, J.; Rodríguez-Soalleiro, R. y Ruiz-González, A.D. 2002. Modelling the effects of thinnings on the diameter distribution of even-aged Maritime pine stands. *Forest Ecology and Management*, 165(1-3): 57-65.
- Álvarez-Romero, E. 2001. Situación y perspectivas del sector forestal en la Comarca Oscos-Eo. Jornadas sobre la Madera y el Sector Forestal. Vegadeo, Octubre de 2001. 258 pp.
- Amateis, R.L. y Burkhart, H.E. 2006. Growth following pruning of young loblolly pine trees: some early results. Gen. Tech. Rep. SRS-92. Asheville, NC: US Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station. pp. 42-44.

- Amateis, R.L. y Burkhart, H.E. 2010. Impact of pruning intensity on growth of young loblolly pine trees: some early results. En: Stanturf, J.A. (Ed.). Proceedings of the fourteenth biennial southern silvicultural research conference. Gen. Tech. Rep. SRS-121. Asheville, NC: US Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station. pp. 51-54.
- Amateis, R.L. y Burkhart, H.E. 2011. Growth of young loblolly pine trees following pruning. *Forest Ecology and Management*, 262: 2338-2343.
- Amidon, E. 1984. A general taper functional form to predict bole volume for five mixed conifer species in California. *Forest Science*, 30(1): 166-171.
- Amponsah, I.; Comeau, P.; Brockley, R. y Lieffers, V. 2005. Effects of repeated fertilization on needle longevity, foliar nutrition, effective leaf area index, and growth characteristics of lodgepole pine in interior British Columbia, Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 35: 440-451.
- Andenmatten, E.; Fassola, H.; Letourneau, F.; Ferrere, P. y Crechi, E. 2002. Predicción de diámetro sobre muñones en *Pinus taeda* L. origen Marion, mediante curvas de perfil de fuste. INTA Argentina. RIA, 31(3): 103-118.
- Andrews, P.L. 2008. BehavePlus fire modeling system, version 4.0: Variables. USDA, Forest Service, General Technical Report RMRS-GTR-213WWW.
- António, N.; Tomé, M.; Tomé, J.; Soares, P. y Fontes, L. 2007. Effect of tree, stand and site variables on the allometry of *Eucalyptus globulus* tree biomass. *Canadian Journal of Forest Research*, 37(5): 895-906.
- Aparicio, J. 2001. Rendimiento y biomasa de *Eucalyptus nitens* con alternativas nutricionales para una silvicultura sustentable en un suelo rojo arcilloso. Tesis Magister en Ciencias. Valdivia, Chile. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile. 234 pp.
- Aparicio, J.L. y Caniza, F.J. 2009. Pautas para la producción de madera libre de nudos de *Pinus* sp. y *Eucalyptus grandis*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Estación Experimental Agropecuaria Bella Vista. Corrientes. 7 pp.
- Aragones, A.; Espinel, S. y Ritter, E. 1994. Caracterización mediante el uso de RAPD de la población de *Pinus radiata* del País Vasco (España). *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 3(2): 135-146.
- Arias, M. 2009. Desarrollo de una tarifa de cubicación con clasificación de productos para *Pinus pinaster* en Asturias. Proyecto Fin de Carrera. Escuela Politécnica Superior de Lugo, Universidad de Santiago de Compostela. 34 pp.
- Assmann, E. 1970. The principles of Forest Yield Study. Pergamon Press, Oxford, New York. 506 pp.
- Aunós, A. 1991. Fundamentos de la poda sobre masas de abeto Douglas y pino laricio de Córcega (1ª parte). *Montes*, 25: 32-36.

B

- Babu, G.J. y Rao, C.R. 2004. Goodness-of-fit tests when parameters are estimated. *Sankhyā: The Indian Journal of Statistics* (2003-2007), 66(1): 63-74.
- Badía, M.; Rodríguez, F. y Broto, M. 2001. Modelos de perfil de árbol. Aplicación al pino radiata (*Pinus radiata* D. Don). En: Actas del III Congreso forestal Español - Sierra Nevada. Granada, 25-28 septiembre 2001. Mesa V, Tomo III: 478-484.

- Bailey, R.L. y Dell, T.R. 1973. Quantifying diameter distributions with the Weibull Function. *Forest Science*, 19: 97-104.
- Balboa, M.A. 2005. Biomasa arbórea y estabilidad nutricional de los sistemas forestales de *Pinus pinaster* Ait., *Eucalyptus globulus* Labill. y *Quercus robur* L. en Galicia. Tesis doctoral. Escuela Politécnica Superior de Lugo, Universidad de Santiago de Compostela. 244 pp.
- Balboa-Murias, M.A.; Rodríguez-Soalleiro, R.; Merino, A. y Álvarez- González, J.G. 2006. Temporal variations and distribution of carbon stocks in aboveground biomass of radiata pine and maritime pine pure stands under different silvicultural regimes. *Forest Ecology and Management*, 237: 29-38.
- Baldwin, V.C. 1987. A summary of equations for predicting biomass of planted southern pines. En: Estimating tree biomass regressions and their error. Proc. of the Workshop on tree biomass regression functions and their contribution to the error of forest inventory estimates. USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. NE-117-303 p. pp. 157-171.
- Baldwin, V.C.; Peterson, K.D.; Burkhardt, H.E.; Amateis, R.L. y Dougherty, P.M. 1997. Equation for estimating loblolly pine branch and foliage weight and surface area distributions. *Canadian Journal of Forest Research*, 27: 918-927.
- Baño-Gómez, V. 2009. Análisis mediante simulación numérica de la pérdida de resistencia de la madera por la presencia de nudos. Tesis Doctoral. Escuela Politécnica Superior de Lugo, Universidad de Santiago de Compostela. 188 pp.
- Bará, S. 1991. Fertilización forestal. Colección Técnica. Consellería de Agricultura, Ganadería y Montes. Xunta de Galicia. Santiago de Compostela.
- Barreiro, M.A. 2003. Estimación de la biomasa y cuantificación del potencial de *Pinus radiata* para el almacenamiento de carbono a medio y largo plazo en Galicia. Proyecto Fin de Carrera. Escuela Politécnica Superior de Lugo, Universidad de Santiago de Compostela.
- Barrera, I.G. 2007. Comportamiento del diámetro del cilindro con defectos en rodales de *Pinus radiata* D. Don, con diferentes regímenes silviculturales. Trabajo Ing. For. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile, Valdivia. 56 pp.
- Barret, J. 1986. Pruning of ponderosa pine. Effect on growth. USDA Forest Service Res. Pap. PNW68, Portland, Oregon. 9 pp.
- Barrio, M.; Castedo, F.; Majada, J. y Hevia, A. 2009. Manual básico de la poda y formación de los árboles forestales. Editorial Mundi-Prensa. Madrid. 255 pp. ISBN: 9788484762867.
- Barrio-Anta M.; Álvarez-González J.G.; Castedo-Dorado F.; Diéguez-Aranda, U.; Parresol, B. y Rodríguez-Soalleiro, R. 2006. Development of a basal area growth system for maritime pine in northwestern Spain using the generalized algebraic difference approach. *Canadian Journal of Forest Research*, 36(6): 1461-1474.
- Barrio-Anta, M.; Balboa-Murias, M.A.; Castedo-Dorado, F.; Diéguez-Aranda, U. y Álvarez-González, J.G. 2006. An ecoregional model for estimating volume, biomass and carbon pools in maritime pine stands in Galicia (northwestern Spain). *Forest Ecology and Management*, 223: 24-34.
- Barrio-Anta, M. y Cámara-Obregón, A. 2008. Resultados preliminares del proyecto de investigación CN-07-94. Estudio del crecimiento y producción de *Pinus pinaster* en

- Asturias. Documento interno (sin publicar). Departamento de Biología de Organismos y Sistemas. Universidad de Oviedo. 27 pp.
- Barrio-Anta, M. y Diéguez-Aranda, U. 2005. Site quality of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) stands in Galicia (northwest Spain). *European Journal of Forest Research*, 124: 19-28.
- Barrio-Anta, M.; Diéguez-Aranda, U.; Castedo-Dorado, F.; Álvarez-González, J.G. y Gadow, K.v. 2007. Merchantable volumen system for pedunculate oak in northwestern Spain. *Annals of Forest Science*, 64: 511-520.
- Bastien, Y. 2005. Arbres-Objectifs - Elagage artificiel. ENGREF Nancy. 21 pp.
- Battaglia, M.; Cherry, M.L.; Beadle, C.L.; Sands, P.J. y Hingston, A. 1998. Prediction of leaf area index in eucalypt plantations: effects of water stress and temperature. *Tree Physiology*, 18: 521-528.
- Battaglia, M. y Sands, P. 1997. Modelling site productivity of *Eucalyptus globulus* in response to climatic and site factors. *Australian Journal of Plant Physiology*, 24: 831-850.
- Battaglia, M. y Sands, P.J. 1998. Process-based forest productivity models and their application in forest management. *Forest Ecology and Management*, 102: 13-32.
- Beadle, C. y Hall, M. 1999. Farm forestry. Technical information sheet, 20(Level 2). Private Forests Tasmania.
- Beadle, C.L.; Honeysett, J.L.; Turnbull, C. y White, D. 1995. Site limits to achieving genetic potential. En: Potts, B.; Borralho, N.; Reid, J.; Cromer, R.; Tibbits, W. y Raymond, C. (Eds.). *Eucalypt Plantations: Improving Fibre Yield and Quality*. Proceedings CRC Temperate Hardwood Forestry. IUFRO Conference, 19-24 February. Hobart, Australia. pp. 325-331.
- Behre, C.E. 1923. Preliminary notes on studies of tree form. *Journal of Forestry*, 21: 507-511.
- Bennet, F.A. y Swindell, B.F. 1972. Taper curves for planted slash pine. USDA Forest Service Res. Note, 179. 4 pp.
- Bennett, M. 2010. Reducing Fire Risk on Your Forest Property. A Pacific Northwest Extension Publication. Oregon State University. PNW 618. pp. 6-12.
- Berninger, F. y Nikinmaa, E. 1994. Foliage area - sapwood relationships of Scots pine (*Pinus sylvestris*) trees in different climates. *Canadian Journal of Forest Research*, 24: 2263-2268.
- Berry, A.B. e Innes, M.R. 1967. Epicormic branching in pruned white spruce. *Can. For. Dep. Bi-Monthly Res. Notes*, 23: 1-7.
- Bert, D. y Danjon, F. 2006. Carbon concentration variations in the roots, stem and Crown of mature *Pinus pinaster* (Ait.). *Forest Ecology and Management*, 222: 279-295.
- Bertalanffy, L.V. 1949. Problems of organic growth. *Nature*, 163: 156-158.
- Bertalanffy, L.V. 1957. Quantitative laws in metabolism growth. *Quarterly Review of Biology*, 32: 217-231.
- Beukema, S.J.; Greenough, D.C.; Robinson, C.E.; Kurtz, W.A.; Reinhardt, E.D.; Crookston, N.L.; Brown, J.K.; Hardy, C.C. y Stage, A.R. 1997. An introduction to the fire and fuels extension to FVS. En: Teck, R.; Mouer, M. y Adams, J. (Eds.).

- Proceedings of the Forest Vegetation Simulator conference: 191-195. USDA Forest Service. Gen. Tech. Rep. INT-373.
- Bi, H. 2000. Trigonometric variable-form taper equations for Australian eucalyptus. *Forest Science*, 46(3): 397-409.
- Bier, H. 1986. Log quality and the strength and stiffness of structural timber. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 16(2): 176-186.
- Biging, G.S. 1984. Taper equations for second growth mixed conifers of Northern California. *Forest Science*, 30: 1103-1117.
- Biging, G.S. 1985. Improved estimates of site index curves using a varying parameter model. *Forest Science*, 31(1): 248-259.
- Biging, G.S. y Dobbertin, M. 1992. A comparison of distance-dependent competition measures for height and basal area growth of individual conifer trees. *Forest Science*, 38: 695-720.
- Binot, J-M. y Adégbidi, H.G. 2006. Les gourmands après l'élagage: qu'en est-il?. Colloque sur l'élagage forestier. Maniwaki, 14-15 mars 2006.
- Bonneau, M. 1995. Fertilisation des forêts dans les Pays tempérés. ENGREF. Nancy.
- Bonomelli, C. y Suárez, D. 1999. Fertilización del eucalipto. 1. Efecto sobre la acumulación de biomasa. *Ciencia e Investigación Agraria*, 26: 1-10.
- Brack, C. 1999. Forest mensuration. Measuring trees, stands and forests for effective forest management. Computer-based course resources for forest mensuration at the Australian National University. Disponible en [Consultado, 20/05/2009]: <http://sres.anu.edu/associated/mensuration/home.htm>.
- Brañas, J.; González-Río, F. y Merino, A. 2000. Contenido de nutrientes en biomasa vegetal y suelos de plantaciones de *Eucalyptus globulus* en el norte de Galicia. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 9: 317-335.
- Bravo, F.; Álvarez-González, J.G.; Del Río, M.; Barrio-Anta, M.; Bonet, J.A.; Bravo-Oviedo, A.; Calama, R.; Castedo-Dorado, F.; Crecente-Campo, F.; Condés, S.; Diéguez-Aranda, U.; González-Martínez, S.C.; Lizarralde, I.; Nanos, N.; Madrigal, A.; Martínez-Millán, F.J.; Montero, G.; Ordóñez, C.; Palahí, M.; Piqué, M.; Rodríguez, F.; Rodríguez-Soalleiro, R.; Rojo, A.; Ruiz-Peinado, R.; Sánchez-González, M.O.; Trasobares, A. y Vázquez-Piqué, J. 2012. Growth and yield models in Spain: historical overview, contemporary examples and perspectives. Instituto Universitario de Investigación en Gestión Forestal Sostenible (Universidad de Valladolid-INIA), Unidad de Gestión Forestal Sostenible (Universidad de Santiago de Compostela). Grafistaff, S.L. 76 pp. ISBN: 978-84-615-7145-1. Disponible en [Consultado, 30/06/2012]: http://www.usc.es/uxfs/IMG/pdf/Growth_and_Yield_WEB.pdf.
- Bravo, F.; Hann, D.W. y Maguire, D.A. 2001. Impact competitor species composition on predicting diameter growth and survival rates of Douglas-fir trees in southwest Oregon. *Canadian Journal of Forest Research*, 31: 2237-2247.
- Bredenkamp, B.V.; Malan, F.S. y Conradie, W.E. 1980. Some effects of pruning on growth and timber quality of *Eucalyptus grandis* in Zululand. *South African Forestry Journal*, 114: 29-34.
- Breusch, T. y Pagan, A. 1979. A simple Test for Heterocedasticity and Random Coefficient Variaton. *Econometrica*, 47: 1287-1294.

- Briggs, D. 1999. Time and Size for Young Coastal Douglas-fir to Occlude After Pruning. Stand Management Cooperative. Fact Sheet. 2 pp.
- Briggs, D.; Jayawickrama, K y Lowell, E. 2012. What do we know about the effects of silviculture and genetics on branches/knots?: Douglas-fir as a case study. En: Final program, proceedings and abstracts book of IUFRO "Forest Products". Conference, Division 5. Estoril Congress Centre, Lisbon (Portugal), 8-13 July 2012.
- Briggs, R.D.; Cunia, T.; White, E.H. y Yawney, H.W. 1987. Estimating sample tree biomass by subsampling: some empirical results. En: Wharton, E.H. y Cunia, T. (comps.). Estimating tree biomass regressions and their error. Proc. of the Workshop on Tree biomass functions and their contribution to the error of forest inventory estimates. USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. NE-117. pp. 119-127.
- Broadmeadow, M. y Matthews, R. 2003. Forests, Carbon and Climate Change: the UK Contribution. Information Note, 48. Forestry Commission, Edinburgh. 12 pp.
- Brown, S. y Lugo, A.E. 1982. The storage and production of organic matter in tropical forests and their role in global carbon cycle. *Biotropica*, 14: 161-187.
- Bruce, R.; Curtis, L. y Coevering, C.v. 1968. Development of a system of taper and volume tables for red alder. *Forest Science*, 14: 339-350.
- Bullock, B.P. y Burkhardt, H.E. 2003. Equations for predicting green weight of Loblolly pine trees in the South. *Southern Journal of Applied Forestry*, 27(3): 153-159.
- Bulman, L.S.; Gadgil, P.D.; Kershaw, D.J. y Ray, J.W. 2004. Assessment and control of *Dothistroma* needle-blight. *Forest Research Bulletin*, 229. 48 pp.
- Burkhardt, H.E. 1987. Data collection and modelling approaches for forest growth and yield prediction. En: Predicting Forest Growth and Yield - Current Issues, Future Prospects. Inst. of Forest Resources. Univ. of Washington. Contribution, 58: 3-16.
- Burkhardt, H.E. 1993. Tree and stand models in forest inventory. En: Nyyssönen, A.; Poso, S. y Rautala, J. (Eds). Proceedings of Ilvessalo symposium on national forest inventory. Finland, 17-21 August 1992. Finnish Forest Research Institute. Research Papers, 444: 164-170.
- Burkhardt, H.E. 2003. Suggestions for Choosing an Appropriate Level for Modelling Forest Stands. En: Amaro, A.; Reed, D. y Soares, P. (Eds.). Modelling Forest Systems. CAB International, Wallingford, UK. pp. 3-10.
- Burkhardt, H.E.; Amateis, R.L.; Westfall, J.A. y Daniels, R.F. 2003. PTAEDA3: Simulation of Individual Tree Growth, Stand Development and Economic Evaluation in Loblolly Pine Plantations. Report, 134. College of Natural Resources, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia. 23 pp.
- Burkhardt, H.E.; Farrar, K.; Amateis, R. y Daniels, R. 2001. Simulation of individual tree growth and stand development in loblolly pine plantations on cutover, site prepared areas. Publication FWS-1-87. Department of forestry. Virginia Tech. 19 pp.
- Burkhardt, H.E. y Walton, S.B. 1985. Incorporating crown ratio into taper equations for loblolly pine trees. *Forest Science*, 31: 478-484.
- Burrows, N.; Ward, B. y Robinson, A. 2000. Behaviour and some impacts of a large wildfire in the Gnaragara maritime pine (*Pinus pinaster*) plantation. Western Australia. CALM Science, 3: 251-260.
- Byrne, J. y Reed, D. 1986. Complex compatible taper and volume estimation systems for red and loblolly pine. *Forest Science*, 32(2): 423-443.

C

- CAE. 2005. Inventario Forestal de la Comunidad Autónoma de Euskadi (CAE) 2005. Departamento de Medio Ambiente, Planificación Territorial, Agricultura y Pesca. Gobierno Vasco. Disponible en [Consultado, 12/06/2012]: http://www.nasdap.ejgv.euskadi.net/r50-15135/es/contenidos/informacion/if_mapa_adatos/es_dapa/adjuntos/Comparacion%20superficies.pdf.
- Cahill, J.M.; Snellgrove, T.A. y Fahey, T.D. 1986. The case for pruning young-growth Douglas-fir. En: Oliver, C.D.; Hanley, D.P. y Johnson, J.A. (Eds.). Proc. Douglas-fir: Stand Management for the Future. Institute of Forest Resources, College of Forest Resources, University of Washington, Seattle, Wash. Contrib., 55. pp. 123-131.
- Calama, R. 2004. Modelo interregional de selvicultura para *Pinus pinea* L. Aproximación mediante funciones con componentes aleatorios. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. 300 pp.
- Cámara, A. 2006. Producción de biomasa en varias especies forestales en Asturias. Fundación Asturiana de la Energía (FAEN). 49 pp.
- Canga, E. 2008. Crecimiento y producción de pinares regulares de *Pinus radiata* D. Don en Asturias. Tesis Doctoral. Universidad de Oviedo. 162 pp.
- Cannell, M.G.R. y Dewar, R.C. 1994. Carbon allocation in trees: a review of concepts for modelling. *Advances in Ecological Research*, 25: 59-104.
- Cañadas, N. 2000. *Pinus pinea* L. en el Sistema Central (Valles del Tiétar y del Alberche): desarrollo de un modelo de crecimiento y producción de piña. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. 356 pp.
- Cao, Q.V.; Burkhardt, H.E. y Max, T.A. 1980. Evaluations of two methods for cubic-foot volume prediction of loblolly pine to any merchantable limit. *Forest Science*, 26(1): 71-80.
- Carballeira, A.; Devesa, C.; Retuerto, R.; Santillán, E. y Ucieda, F. 1983. Bioclimatología de Galicia. Fundación Barrié de la Maza, A Coruña. 391 pp.
- Carey, H. y Schumann, M. 2003. Modifying wildfire behavior - the effectiveness of fuel treatments. The status of our knowledge. National Community Forestry Center, Southwest Region Working Paper 2.
- Carson, M.J. 1987. Improving log and wood quality: the role of the radiata pine improvement programme. *New Zealand Journal of Forestry*, 31(4): 26-30.
- Carson, M.J. e Inglis, C.S. 1988. Genotype and location effects on internode length of *Pinus radiata* in New Zealand. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 18(3): 267-279.
- Carvalho, J.P. y Parresol, B. 2003. Additivity in tree biomass components of Pyrenean oak (*Quercus pyrenaica* Willd.). *Forest Ecology and Management*, 179: 269-276.
- Castedo-Dorado, F. 2004. Modelo dinámico de crecimiento para las masas de *Pinus radiata* D. Don en Galicia. Simulación de alternativas selvícolas con inclusión del riesgo de incendio. Tesis Doctoral. Escuela Politécnica Superior de Lugo, Universidad de Santiago de Compostela. 297 pp.

- Castedo-Dorado, F.; Álvarez-Álvarez, P.; Barrio-Anta, M. y Crecente-Campo, F. 2009a. Development a stand density management diagram for radiata pine stands including assessment of stand stability. *Forestry*, 82: 1-16.
- Castedo-Dorado, F.; Álvarez-Álvarez, P.; Quintaiors, R. y Barrio-Anta, M. 2009b. Inclusión de riesgos abióticos en diagramas de manejo de la densidad. Un caso de estudio en masas de *Pinus pinaster* Ait. Ref: 5CFE01-190. 5º Congreso Forestal Español, Ávila, Septiembre 2009.
- Castedo-Dorado, F. y Álvarez-González, J.G. 2000. Construcción de una tarifa de cubicación con clasificación de productos para *Pinus radiata* D. Don en Galicia basada en una función del perfil del tronco. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 9(2): 253-268.
- Castedo-Dorado, F.; Crecente-Campo, F.; Álvarez-Álvarez, P. y Barrio-Anta, M. 2007a. Development of a stand density management diagram for radiata pine stands including assessment of stand stability. *Forestry*, 82: 1-16.
- Castedo-Dorado, F.; Diéguez-Aranda, U. y Álvarez-González, J.G. 2007b. A growth model for *Pinus radiata* D. Don stands in north-western Spain. *Annals of Forest Science*, 64: 453-465.
- Cela, M.C. 2004. Estimación de la biomasa y cuantificación del potencial de *Quercus robur* L. y *Betula alba* L. para el almacenamiento de carbono a medio y largo plazo en Galicia. Trabajo de investigación fin de carrera. Escuela Politécnica Superior de Lugo, Universidad de Santiago de Compostela.
- Cervera, J.M. 1973. El área basimétrica reducida, el volumen reducido y el perfil. *Montes*, 1973: 415-418.
- Clark, A. 1982. Predicting biomass production in the South. En: Hotvedt, J.E. y Jackson, B.D. (Eds.). *Predicting growth and yield in the Mid-South*. 31st Annual For. Symp. Louisiana State University, Baton Rouge, LA. pp. 119-139.
- Clatterbuck, W.K. 2002. Growth of a 30-year Cherrybark oak plantation 6 years after 19 thinning. En: Outcalt, K.W. (Ed.). *Proceedings of the Eleventh Biennial Southern Silvicultural Research 20 Conference*. USDA For. Ser., Gen. Tech. Rep. SRS-48, Asheville-NC, 21. pp. 189-192.
- Clutter J. 1980. Development of taper functions from a variable-top merchantable volume equations. *Forest Science*, 26(1): 117-120.
- Clutter, J.L.; Fortson, J.C.; Pienaar, L.V.; Brister, G.H. y Bailey, R.L. 1983. *Timber management a quantitative approach*. Krieger Publishing Company. New York. 333 pp.
- Collier, R.L. y Turnblom, E.C. 2001. Response of coastal Douglas-fir to live crown reduction: Epicormic branching. *Western Journal of Applied Forestry*, 16(2): 80-86.
- Corona, A.V.; Rodríguez, J.; Benítez, J.Y.; Álvarez, R.C. y Gra, H. 2002. Estimación de la biomasa de copa para árboles en pie de *Pinus tropicalis* morelet en la empresa forestal integral Macurije de la provincia de Pinar del Río, Cuba. *Revista Floresta*, 32(2): 261-265.
- Corral-Rivas, J.J.; Álvarez- González, J.G.; Aguirre, O. y Hernández, F.J. 2005. The effect of competition on individual tree basal area growth in mature stands of *Pinus cooperi* Blanco in Durango (Mexico). *European Journal of Forest Research*, 124: 133-142.

- Corral-Rivas, J.J.; Diéguez-Aranda, U.; Corral-Rivas, S. y Castedo-Dorado, F. 2007. A merchantable volume system for major species in El Salto, Durango (México). *Forest Ecology and Management*, 238: 118-129.
- Corral-Rivas, S.; Názar, J.J. y Fernández-Sánchez, F. 1999. Ajuste de funciones de ahusamiento a los perfiles fustales de cinco pináceas de la región de El Salto, Durango. *Madera y Bosques*, 5(2): 53-65.
- Costas, R.; Korth, S.; Figueredo, S.; Weber, E.; Mac Donagh, P.; Friedl, A.; Heck, J. y Alves do Porto, M. 2007. Sistema de ecuaciones de producción y crecimiento de *Pinus taeda* L. con variables asociadas a las podas. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 16(2): 136-144. Disponible en [Consultado, 10/06/2010]: www.inia.es/srf ISSN: 1131-7965.
- Costas, R.; Mac Donagh, P.; Weber, E.; Figueredo, S.; Gómez, C. e Irschick, P. 2006. Modelos predictivos de la producción de *Pinus taeda* empleando variables vinculadas con las podas. *Bosque*, 27(2): 98-107.
- Costas, R.A.; Mac Donagh, P.; Weber, E.; Figueredo, S. e Irschick, P. 2005. Influencias de la densidad y podas sobre la producción de *Pinus taeda* L. a los 7 años de edad. *Ciencia Florestal*, 15(3): 275-284.
- Cosens, R.D. 1952. Epicormic branching on white fir (*Abies concolor*). *Journal of Forestry*, 50: 939-940.
- Courdier, F.; Sindou, C. y Bert, D. 2002. Effet de l'élagage artificiel sur la croissance et le statut social du Pin maritime dans les Landes de Gascogne. *Revue Forestière Française*. LIV, 3: 239-252.
- Cown, D. 1992. New Zealand radiata pine and Douglas fir: suitability for processing. *Forest Research Institute Bulletin*, 168. Ministry of Forestry. Forest Research Institute, Rotorua, New Zealand.
- Crabiffosse, A. 2009. Estimación de la biomasa arbórea por alturas en masas jóvenes de regeneración natural de *Pinus pinaster* Aiton en Asturias. Proyecto Fin de Carrera. Escuela Politécnica Superior de Lugo, Universidad de Santiago de Compostela.
- Crecente, F.; Ferreiro-Abelairas, H.; Barrio, M. y Rojo, A. 2005. Ensayo de aplicación de claras de selección en *Pinus pinaster* Ait. en Galicia. IV Congreso Forestal Español. Zaragoza, 26-30 de septiembre de 2005. Libro de actas, mesa temática 3.
- Crecente-Campo, F. 2008. Modelo de crecimiento de árbol individual para *Pinus radiata* D. Don en Galicia. Tesis Doctoral. Escuela Politécnica Superior de Lugo, Universidad de Santiago de Compostela. 133 pp.
- Crecente-Campo, F.; Diéguez-Aranda, U.; Soares, P. y Tomé, M. 2010. Modelling annual individual-tree growth and mortality of Scots pine with data obtained at irregular measurement intervals and containing missing observations. *Forest Ecology and Management*, 260: 1965-1974.
- Crecente-Campo, F.; Pommerening, A. y Rodríguez-Soalleiro, R. 2009. Impacts of thinning on structure, growth and risk of crown fire in a *Pinus sylvestris* L. plantation in northern Spain. *Forest Ecology and Management*, 257: 1945-1954.
- Crecente-Campo, F.; Rojo, A. y Diéguez-Aranda, U. 2009. A merchantable volume system for *Pinus sylvestris* in the major mountain ranges of Spain. *Annals of Forest Science*, 66: 808p1-808p12.

- CRPF, 2002. L'élague des arbres forestiers. Forêt Privée Française. Centre Régional de la Propriété Forestière de Bretagne. 4 pp.
- Cruz, M.G. 1999. Modeling the initiation and spread of crown fires. M.Sc.Thesis. Univ. Mont., Missoula, Montana, USA.
- Cruz, M.G.; Alexander, M.E. y Wakimoto, R.H. 2003a. Assessing the probability of crown fire initiation based on fire danger indices. *Forestry Chronicle*, 79(5): 976-983.
- Cruz, M.G.; Alexander, M.E. y Wakimoto, R.H. 2003b. Assessing canopy fuel stratum characteristics in crown fire prone fuel types of western North America. *International Journal of Wildland Fire*, 12: 39-50.
- Cruz, M.G.; Alexander, M.E. y Wakimoto, R.H. 2004. Modelling the likelihood of crown fire occurrence in conifer forest stands. *Forest Science*, 50(5): 640-658.
- Cruz, M.G.; Alexander, M.E. y Wakimoto, R.H. 2005. Development and testing of models for predicting crown fire rate of spread in conifer forest stands. *Canadian Journal of Forest Research*, 35: 1626-1639.
- Cruz, M.G.; Butler, B.W.; Alexander, M.E.; Forthofer, J.M. y Wakimoto, R.H. 2006. Predicting the ignition of crown fuel above a spreading surface fire. Part I: model idealization. *International Journal of Wildland Fire*, 15: 47-60.
- Cuadros-Tavira, S.C. 1997. Efectos dasométricos a corto plazo de una clara sobre masa de *Pinus sylvestris* L. en parcelas de repoblaciones en Sierra Nevada. II Congreso Forestal Español. Tomo 2CFE04-031-T4: 185-190.
- Culpepper, D. 2012. Minimizing epicormic branch formation on Louisiana leading commercial bottomland red oaks. Louisiana State University Agricultural and Mechanical College. 46 pp.
- Cunia, T. 1979. On sampling trees for biomass table construction: some statistical comments. En: Frayer, W.E. (Ed.). Colorado State Univ., Fort Collins. Forest resource inventories, 2: 643-664.
- Cunia, T. 1986. Construction of tree biomass tables by linear regression techniques. En: Wharton, E.H. y Cunia, T. (Ed.). Estimating tree biomass regressions and their error. Proceedings of the Workshop on tree biomass regression functions and their contribution to the error of forest inventory estimates. 26-30 May. Syracuse, New York. pp. 27-37.
- Cunia, T. 1988. On the error of biomass regressions and the corresponding inventory estimates. En: Daniels, R.A.; Watson, W.F. y Savelle, I.W. (Eds.). Proceedings of the 9th Annual Southern Forest Biomass. Workshop, Mississippi State Univ, Mississippi Stae. pp. 93-109.
- Cunia, T. y Briggs, R.D. 1984. Forcing additivity of biomass tables: some empirical results. *Canadian Journal of Forest Research*, 14: 376-384.
- Cyr, G. 2006. Les effets de l'élague sur le croissance. En: Actes du colloque Élaguer pour enrichir nos forêts. 14-15 de mars 2006, Maniwaki, Quebec. pp. 11-14.

CH

- Chambonnet, F. 2005. Prévention des feux de forêts et gestion des forêts privées en Ardèche. T. XXVI: 87-90.

- Chauchard, L. y Olalde, M. 2006. Correcciones a la poda del pino radiata en Euskadi. Basoko Teknika/Técnica Forestal. Euskadi Forestal (abril, 2006): 34-39.
- Chauchard, L.M. y Olalde, M. 2005. Poda del pino radiata en Euskadi. Diputación Foral de Guipuzkoa. 15 pp.
- Chauchard, L. y Sbrancia, R. 2003. Modelos de crecimiento diamétrico para *Nothofagus obliqua*. Bosque, 24(3): 3-16.
- Chave, J.; Riéra, B. y Dubois, M-A. 2001. Estimation of biomass in a neotropical forest of French Guiana: spatial and temporal variability. Journal of Tropical Ecology, 17: 79-96.
- Cherry M.; Hingston, A.; Battaglia, M. y Beadle, C. 1998. Calibrating the LI-COR LAI-2000 for estimating leaf area index in eucalypt plantations. Tasforests, 10: 75-82.
- Cherry, M.; Macfarlane, C.; Smethurst, P. y Beadle, C. 2002. Visual guide to leaf area index of Eucalypt plantations. Hobart, Australia. Cooperative Research Centre for Sustainable Production Forestry. 24 pp.
- Chiyenda S.S. y Kozak, A. 1984 Additivity of component biomass regression equations when the underlying model is linear. Canadian Journal of Forest Research, 14: 441-446.

D

- Daniels, R.F.; Burkhardt, H.E. y Clason, T.R. 1986. A comparison of competition measures for predicting growth of loblolly pine trees. Canadian Journal of Forest Research, 16: 1230-1237.
- Dans del Valle, F.; Fernández de Ana-Magán, F.J. y Romero, A. 1999. Manual de silvicultura del pino radiata en Galicia. Proxecto Columella. Escola Politécnica Superior de Lugo. Disponible en [Consultado, 20/05/2006]: <http://agrobyte.lugo.usc.es/agrobyte/publicaciones/pinoradiata/indice.html>.
- Davel, M. y Sepúlveda, E. 2000. Poda en plantaciones de Pino Oregón. CIEFAP-Patagonia - Forestal-Año VI(1): 7-10.
- De Montigny, L. y Stearns-Smith, S. 2001. Thinning and pruning coastal Douglas-fir near Chilliwack, B.C.: 8 years results. British Columbia Ministry of Forests, Research Branch, Extension Note, 56. 8 pp.
- De Vries, P.G. 1986. Sampling theory for forest inventory: a teach-yourself course. Springer-Verlag, Berlin. 399 pp.
- De Wit, C.T. 1959. Potential photosynthesis of crop surfaces. Netherlands Journal of Agricultural Sciences, 7: 141-149.
- Deal, R.L.; Barbour, R.J.; McClellan, M.H. y Parry, D.L. 2003. Development of epicormic sprouts in Sitka spruce following thinning and pruning in southeast Alaska. Forestry, 76: 401-412.
- Dean, M.; Kimberley, M.; Silcock, P. y Webster, R. 2007. Chapter 7: pruning and thinning. En: Ian Nicholas (Ed.). Best Practice with Farm Forestry Timber Species, 3: REDWOODS. NZFFA Electronic Handbook Series. Disponible en [Consultado, 15/09/2011]: http://www.scionresearch.com/_data/assets/pdf_file/0016/17521/RW07-Chapter-7C-Redwood.pdf.

- DeBell, J.D. y Gartner, B.L. 1997. Stem characteristics on the lower log of 35-year-old western red cedar grown at several spacings. *Western Journal of Applied Forestry*, 12(1): 9-15.
- Del Tredici, P. 2001 Sprouting in temperate trees: a morphological and ecological review. *The Botanical Review*, 67(2): 121-140.
- Demaerschalk, J. 1972. Converting volume equations to compatible taper equations. *Forest Science*, 18(3): 241-245.
- Demaerschalk, J. 1973. Integrated systems for the estimation of tree taper and volume. *Canadian Journal of Forest Research*, 3(1): 90-94.
- Demaerschalk, J. y Kozak, A. 1977. The whole bole system: a conditioned dual equation system for precise prediction of tree profiles. *Canadian Journal of Forest Research*, 7: 488-497.
- DGCN. 2001. Tercer Inventario Forestal Nacional 1997-2006. Galicia. A Coruña. Dirección General de Conservación de la Naturaleza, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid. 371 pp. Disponible en [Consultado, 17/04/2012]:
<http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/ifn3.aspx>.
- DGCN. 2002a. Tercer Inventario Forestal Nacional 1997-2006. Galicia. Lugo. Dirección General de Conservación de la Naturaleza, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid. 354 pp. Disponible en [Consultado, 17/04/2012]:
<http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/ifn3.aspx>.
- DGCN. 2002b. Tercer Inventario Forestal Nacional 1997-2006. Galicia. Ourense. Dirección General de Conservación de la Naturaleza, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid. 354 pp. Disponible en [Consultado, 17/04/2012]:
<http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/ifn3.aspx>.
- DGCN. 2002c. Tercer Inventario Forestal Nacional 1997-2006. Galicia. Pontevedra. Dirección General de Conservación de la Naturaleza, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid. 314 pp. Disponible en [Consultado, 17/04/2012]:
<http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/ifn3.aspx>.
- DGCN. 2003. Tercer Inventario Forestal Nacional 1997-2006: Principado de Asturias. Dirección General de Conservación de la Naturaleza, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid. 239 pp. + CD-Rom. Disponible en [Consultado, 17/04/2012]:
<http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/ifn3.aspx>.
- DGCN. 2004. Tercer Inventario Forestal Nacional 1997-2006. Cantabria. Dirección General de Conservación de la Naturaleza, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid. Disponible en [Consultado, 17/04/2012]:
<http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/ifn3.aspx>.
- Díaz-Franco, R.; Acosta-Mireles, M.; Carrillo-Anzures, F.; Buendía-Rodríguez, E.; Flores-Ayala, E. y Etchevers-Barra, J.D. 2007. Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham. *Madera y bosques*, 13(1): 25-34.

- Diéguez-Aranda, U. 2004. Modelo dinámico de crecimiento para masas de *Pinus sylvestris* L. procedentes de repoblación en Galicia. Tesis Doctoral. Escuela Politécnica Superior de Lugo, Universidad de Santiago de Compostela. 178 pp.
- Diéguez-Aranda, U.; Álvarez-González, J.G.; Balboa-Murias, M.A.; Barrio-Anta, M.; Castedo-Dorado, F.; Crecente-Campo, F.; González-González, J.M.; Gorgoso-Varela, J.J.; López-Sánchez, C.A.; Pérez-Cruzado, C.; Rodríguez-Soalleiro, R.; Rojo-Alboreca, A. y Sánchez-Rodríguez, F. 2009. Herramientas selvícolas para la gestión forestal sostenible en Galicia. Consellería do Medio Rural, Xunta de Galicia. 268 pp. + CD-Rom.
- Diéguez-Aranda, U.; Barrio-Anta, M.; Castedo-Dorado, F.; Ruiz-González, A.D.; Álvarez-Taboada, M.F.; Álvarez-González, J.G. y Rojo, A. 2003. Dendrometría. Editorial Mundi-Prensa y Fundación Conde del Valle de Salazar. Madrid. 325 pp. ISBN 84-86793-93-9 (Fundación Conde del Valle de Salazar) y 84-8476-145-2.
- Diéguez-Aranda, U.; Castedo-Dorado, F.; Álvarez-González, J.G. y Rojo, A. 2006. Compatible taper function for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) plantations in Northwestern Spain. Canadian Journal of Forest Research, 36: 1190-1205.
- Domínguez-Domínguez, M.; Bravo, F. y Del Río, M. 2006. Modelos del tamaño de copa de *Pinus sylvestris* L. en bosques del Centro de España. Interciencia. MAR, 31(3): 168-175.
- Draper, N. y Smith, H. 1981. Applied Regression Analysis, Second Edition, New York: John Wiley & Sons, Inc. 709 pp.
- Dumbrell, I.C. y McGrath, J.F. 2002. Growth and nutrient relationships of juvenile *Pinus pinaster* grown on ex-farmland in Western Australia. Australian Forestry, 66: 137-144.
- Durbin, J. y Watson, G.S. 1951. Testing for serial correlation in least squares regression II. Biometrika, 30: 159-178.
- Dvorak, V.; Oplustilova, M. y Janous, D. 1996. Relation between leaf biomass and annual ring sapwood of Norway spruce according to needle age-class. Canadian Journal of Forest Research, 26: 1822-1827.

E

- Echeverría, I. 1942. Ensayo de tablas de producción del *Pinus insignis* en el norte de España. Boletines del IFIE, 22. Madrid. 67 pp.
- Echeverría, I. 1959. Pinares del Norte. La nudosidad de la madera y modo de evitarla. Manuales técnicos. Ministerio de Agricultura. Madrid. 62 pp.
- Echeverría, I. y De Pedro, S. 1948. El *Pinus pinaster* en Pontevedra. Su productividad normal y aplicación a la celulosa industrial. Boletines del IFIE, 38. Madrid. 147 pp.
- Endo, M. y Velez-Mesa, G. 1992. Results of a pruning trial with *Pinus patula* in Colombia. IPEF INTERNATIONAL. Piracicaba, 2: 45-49.
- Enersilva, 2007. Promoción del uso de la biomasa forestal con fines energéticos en el suroeste de Europa (2004-2007). Proyecto Enersilva. 40 pp.
- England, M. 1998. Pruning guidelines for farm forestry. Farm Forestry, Note 6/98. 8 pp.
- Enriquez, E. 2010. Informes técnicos de los grandes incendios, contenido para elaborar una base de datos. Taller "Experiencias adquiridas de los grandes incendios 2007-2009". Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. 13-15 enero, Córdoba.

- Erviti, J.J. 1991. Desarrollo de modelos de crecimiento y producción de las masas forestales de *Pinus halepensis* Mill. En España. Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Universidad Politécnica de Madrid. 319 pp.
- Espinosa, M. y Muñoz, F. 2005. Silvicultura de Plantaciones. Concepción de Chile. Universidad de Concepción. Facultad de Ciencias Forestales. Chile. 153 pp.
- ESRI. 2006. Environmental Systems Research Institute. ArcGIS 9.1[®]. ESRI, Redlands, California.
- Evans, H.F.; Mcnamara, D.G.; Braasch, H.; Chadoeuf, J. y Magnusson, C. 1996. Pest risk analysis (PRA) for the territories of the European Union (as PRA area) on *Bursaphelenchus xylophilus* and its vector in the genus *Monochamus*. EPPO Bulletin, 26: 199-249.
- Evers, J.B.; Vos, J.; Chelle, M.; Andrieu, B.; Fournier, C. y Struik, P.C. 2007. Simulating the effects of localized red: far-red ratio on tillering in spring wheat (*Triticum aestivum*) using a three-dimensional virtual plant model. New Phytologist, 176: 325-336.

F

- Fang, Z. y Bailey, R.L. 1999. Compatible volume and taper models with coefficients for tropical species on Hainan Island in Southern China. Forest Science, 45(1): 85-100.
- Fang, Z.; Borders, B.E. y Bailey, R.L. 2000. Compatible volume-taper models for loblolly and slash pine based on a system with segmented-stem form factors. Forest Science, 46: 1-12.
- FAO. 2001. Global forest resources assessment. FAO Forestry Paper 140. Food and Agriculture. Organization of the United Nations, Rome.
- Fassola, H.E. 1993. Regímenes silvícolas con producción de madera libre de nudos en *Pinus elliotti* Engelm en la zona central de la provincia de Corrientes. 1^{er} informe de avance: el control de diámetro sobre muñón en 15 cm con tratamientos directos, en dos operaciones de poda. Ivyraretá, 3: 28-62.
- Fassola, H.E. 2001 Gestión de la calidad del proceso de trabajo de poda en una PYME de servicios forestales. Tesis de grado Maestría en Administración Estratégica de Negocios. Facultad de Ciencias Económicas, Universidad Nacional de Misiones. 153 pp.
- Fassola, H.E.; Crechi, E.; Videla, D. y Keller, A. 2008a. Estudio preliminar del rendimiento en el aserrado de rollizos de rodales de *Pinus taeda* L. con distintos regímenes silvícolas. XIII Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales. Facultad de Ciencias Forestales, UNAM-EEA Montecarlo, INTA. Eldorado, Misiones, Argentina. "2008 Año de las Ciencias". 11 pp.
- Fassola, H.E.; Fahler, J.; Ferrere, P.; Allegranza, D. y Bernio, J. 1999a. Determinación del cilindro con defectos en rollizos podados de *Pinus taeda* L. y su relación con el rendimiento en madera libre de nudos. Informe final. PIA, 20/96. Inédito INTA EEA Montecarlo.
- Fassola, H.E.; Ferrere, P. y Gelid de Ruibal, M. 1999b. Crecimiento en área basal de plantaciones jóvenes de *Pinus taeda* L. origen Marion. Informe final PIA, 20/96. Inédito, INTA EEA Montecarlo.

- Fassola, H.E.; Ferrere, P. y Gelid de Ruibal, M. 2008b. Crecimiento en área basal de *Pinus taeda* L. en relación a la longitud de copa verde. Revista Forestal YVYRARETA, 15: 6-13.
- Fassola, H.E.; Ferrere, P. y Rodríguez, A.F. 1999c. Predicción del diámetro sobre muñones en árboles podados de *Pinus taeda* L. origen Marion en el NE de Corrientes. Informe final PIA 20/96. Inédito INTA EEA, Montecarlo.
- Fassola, H.E.; Ferrere, P. y Rodríguez, A.F. 2002a. Predicción del diámetro máximo sobre muñón en árboles podados de *Pinus taeda* L. origen Marion en el NE de Corrientes, Argentina. Bosque, 23(1): 3-9.
- Fassola, H.E.; Ferrere, P.; Rodríguez, A.F.; Allegranza, D.; Hernández, A.; Durán, M. y Reboratti, H. 1999d. Crecimiento de árboles dominantes en fase juvenil de *Pinus taeda* L. en el NE de Corrientes sometidos a distintos tratamientos silvícolas. INTA EEA Montecarlo, Diciembre 1999. Informe Final PIA, 20/96 "Manejo Intensivo de *Pinus taeda* L.". Inédito.
- Fassola, H.E. y Gelid de Ruibal, M. 1997. Diámetro máximo sobre muñones al momento de la primer poda en árboles dominantes de *Pinus taeda* L. del Dpto de Iguazú, Misiones. Inf. Téc., 19. INTA EEA Montecarlo.
- Fassola, H.E.; Gelid de Ruibal, M. y Ferrere, P. 1999e. Predicción del diámetro sobre muñones en ejemplares de *Pinus taeda* L. origen Marion en dpto. Iguazú, Misiones. Informe final PIA 20/96. Inédito INTA EEA, Montecarlo.
- Fassola, H.E.; Moscovich, F.A.; Domecq, C.M.; Ferrere, P.; Lacorte, S.; Hampel, H.; Maletti, C. y Alegranza, D. 2004. Regulación de la densidad en rodales de *Grevillea robusta* A. Cunn. Para la producción de madera de calidad y forraje en el sur de la provincia de Misiones. RIA, 33(1): 15-38. Abril 2004.
- Fassola, H.E.; Moscovich, F.A.; Ferrere, P. y Rodríguez, F.A. 2002b. Evolución de las principales variables de árboles de *Pinus taeda* L. sometidos a diferentes tratamientos silviculturales en el nordeste de la provincia de Corrientes, Argentina. Ciência Florestal, Santa Maria, 12(2): 51-60.
- Fassola, H.E.; Rodríguez, F.; Allegranza, D.; Hernández, A.; Ferrere, P.; Duran, M. y Reboratti, H. 1999f. Efecto de tratamientos silvícolas directos para aserrado sobre ejemplares de *Pinus taeda* origen Marion, en el NE de Corrientes. Inf. Tec., 22. INTA EEA, Montecarlo.
- Fassola, H.E.; Rodríguez, F.; Allegranza, D.; Hernández, A.; Ferrere, P.; Duran, M. y Reboratti, H. 1999g. Resultado de tratamiento silvícolas directos en *Pinus taeda* origen Marion en el NE de Corrientes. PIA, 20/96. 3º informe de avance. Inédito. INTA EEA, Montecarlo.
- Fenton, R.; Sutton, W. y Tustin, J. 1972. Clearwood yields from tended 26-year-old, second-crop, radiata pine. New Zealand Journal of Forestry Science, 1(2): 140-59.
- Fernandes, P.M.; Loureiro, C.A. y Botelho, H.S. 2004. Fire behaviour and severity in maritime pine stand under differing fuel conditions. Annals of Forest Science, 61: 537-544.
- Fernandes, P.M. y Rigolot, E. 2007. The fire ecology and management of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.). Forest Ecology and Management, 241: 1-13.

- Fernández, J.M. y Solla, A. 2006. Mapas de riesgo de aparición y desarrollo de la enfermedad del marchitamiento de los pinos (*Bursaphelenchus xylophilus*) en Extremadura. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 15(2): 141-151.
- Fernández-Golfin, J.I.; Conde, M.; Hermoso, E. y Carballo, J. 2008. Madera de pino radiata: conclusiones tras 25 años de trabajos. *Revista AITIM (Asociación de Investigación de las Industrias de la Madera)*. Boletín de Información Técnica, 252(marzo-abril). 5 pp.
- Fernández-Manso, A. y Sarmiento-Maillo, A. (coords.). 2004. El pino radiata (*Pinus radiata*): Manual de gestión forestal sostenible. Junta de Castilla y León (Serie divulgativa). 62 pp.
- Fernández-Rivas, E. 2008. Estimación de ecuaciones de biomasa para *Eucalyptus nitens* (Maiden). Proyecto fin de carrera. Escuela Politécnica Superior de Lugo, Universidad de Santiago de Compostela. 115 pp.
- Ferreira, O. y Galante, M. 2003. Mata Nacional de Leiria, 2 e 3 de Agosto 2003. Relatório de ocorrência. DGF, Lisboa.
- Finkral, A.J. y Evans, A.M. 2008. The effects of a thinning treatment on carbon stocks in a northern Arizona ponderosa pine forest. *Forest Ecology and Management*, 255: 2743-2750.
- Finney, M.A. 1998. FARSITE: Fire area simulator-Model development and evaluation. USDA For. Serv. Res. Pap. RMRS-RP-4.
- Flores, F.J. y Lee, H. 2004. Efectos del clima y capacidad de almacenamiento de agua del suelo en la productividad de rodales de pino radiata en Chile: un análisis utilizando el modelo 3-PG. *Bosque (Valdivia)*, 25(3): 11-24.
- Fölster, H. y Khanna, P.K. 1997. Dynamics of nutrient supply in plantations soils. En: Nambiar, E.K.S. y Brown, A.G. *Management of soil nutrient and water in tropical plantation forests*. Australian Centre for International Agricultural Research (ACIAR). Canberra. Monograph, 43: 339-378.
- Fontaine, F.; Druelle, J.L.; Clément, C.; Burrus, M. y Audran, J.C. 1998. Ontogeny of proventitious epicormic buds in *Quercus petraea*. I. In the 5 years following initiation. *Trees*, 13: 54-62.
- Fontaine, F.; Mothe, F.; Colin, F. y Duplat, P. 2004. Structural relationships between the epicormic formations on the trunk surface and defects induced in the wood of *Quercus petraea*. *Trees - Structure and Function*, 18: 295-306.
- Fontan, I.C.I.; Reis, G.G.; Reis, M.G.F.; Leite, H.G.; Monte, M.A.; Ramos, D.C. y Souza, F.C. 2011. Growth of pruned eucalypt clone in an agroforestry system in southeastern Brazil. *Agroforestry Systems*, 38: 1-11.
- Fonweban, J.; Gardiner, B.; Macdonald, E. y Auty, D. 2011. Taper functions for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and Sitka spruce (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.) in Northern Britain. *Forestry*, 84(1): 49-60.
- Forestry Canada Fire Danger Group. 1992. Development and structure of the Canadian Forest Fire Behavior Prediction System. For. Can. Inf. Rep. ST-X-3.
- Forrester, D.I.; Collopy, J.J.; Beadle, C.L. y Baker, T.G. 2012. Interactive effects of simultaneously applied thinning, pruning and fertiliser application treatments on growth, biomass production and crown architecture in a young *Eucalyptus nitens* plantation. *Forest Ecology and Management*, 267: 104-116.

- Forrester, D.I.; Medhurst, J.L.; Wood, M.; Beadle, C.L. y Valencia, J.C. 2010. Growth and physiological responses to silviculture for producing solid-wood products from *Eucalyptus* plantations: an Australian perspective. *Forest Ecology and Management*, 259: 1819-1835.
- Forslund, R. 1990. The power function as a simple stem profile examination tool. *Canadian Journal of Forest Research*, 21: 193-198.
- Fox, J.C.; Ades, P.K. y Bi, H. 2001. Stochastic structure and individual-tree growth models. *Forest Ecology and Management*, 154: 261-276.
- Furnival, G.M. 1961. An index for comparing equations used on constructing volume tables. *Forest Science*, 7: 337-341.

G

- Gadgil, P.D. y Bawden, A.D. 1981. Infection of wounds in *Eucalyptus delegatensis*. *New Zealand Journal of Forest Science*, 11(3): 262-270.
- Gadow, K.v.; Real, P. y Álvarez-González, J.G. 2001. Modelización del crecimiento y la evolución de los bosques. *IUFRO World Series*, Vienna, 12. 242 pp.
- Galera, R.M.; Martín-Albertos, S.; Alía, R.; Gordo, J.; Aguado, A.M. y Notivol, E. 1997. Manual de selección de masas productoras de semillas. Evaluación de caracteres. Monografías INIA, núm. 97. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA). Madrid. 92 pp.
- Garber, S.M. y Maguire, D.A. 2003. Modelling stem taper of three central Oregon species using nonlinear mixed effects models and autoregressive error structures. *Forest Ecology and Management*, 179: 507-522.
- García, O. 1988. Growth modelling - a (re)view. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 33(3): 14-17.
- García, O. 1990. Growth of Thinned and Pruned Stands. En: James, R. N. y Tarlton, G.L. (Eds.) *New Approaches to Spacing and Thinning in Plantation Forestry*. New Zealand Ministry of Forestry, Forest Research Institute Bulletin, 151.
- García, O. 1993. Stand growth models: theory and practice. En: *Advancement in forest inventory and forest management sciences. Proceedings of the IUFRO Seoul Conference*, Seul, 20-25 September. pp. 22-45.
- García, O. 1994. The state-space approach in growth modelling. *Canadian Journal of Forest Research*, 24: 1894-1903.
- García, O. 2003. Dimensionality reduction in growth models: an example. *Forest biometry, Modelling and Information Sciences*, 1: 1-15.
- García del Barrio, J.M.; De Miguel, J. e Iglesias, S. 2001. Regiones de Identificación y Utilización del Material Forestal de Reproducción. Ministerio de Medio Ambiente, Organismo Autónomo de Parques Nacionales. Madrid. Disponible en [Consultado, 28/07/2009]:
http://www.mma.es/images/general/biodiversidad/montes_politica_forestal/mapa_regiones2.gif.
- García-Güemes, C.; Cañadas, N. y Montero, G. 2002. Modelización de la distribución diamétrica de las masas de *Pinus pinea* L. de Valladolid (España) mediante la función Weibull. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 11(2): 263-282.

- García-Serna, I. 2011. *Diplodia pinea* (Desm.) Kickx y *Fusarium circinatum* Nirenberg & O'Donnell, principales hongos de chancro de las masas forestales de *Pinus radiata* D. Don del País Vasco. Tesis Doctoral. Universidad del País Vasco. 228 pp.
- Gary, H.L. 1978. The Vertical Distribution of Needles and Branchwood in Thinned and Unthinned 80-Year-Old Lodgepole Pine. *Northwest Science*, 52(4): 303-309.
- Geber, M.A. 1990. The cost of meristem limitation in *Polygonum arenastrum*: negative genetic correlations between fecundity and growth. *Evolution*, 44: 799-819.
- Geldres, E.; Gerding, V. y Schlatter, J.E. 2006. Biomasa de *Eucalyptus nitens* de 4-7 años de edad en un rodal de la X Región, Chile. *Bosque (Valdivia)*, 27(3): 223-230.
- Gerding, V. y Schlatter, J.E. 1995. Variables y factores del sitio de importancia para la productividad de *Pinus radiata* D. Don en Chile. *Bosque*, 16(2): 39-56.
- Gerrand, A.M.; Medhurst, J.L. y Neilsen, W.A. 1997. Research results for thinning and pruning eucalypt plantations for sawlog production in Tasmania Forestry, Tasmania. ISBN 0724635831 y 9780724635832. 209 pp.
- Gerrand, A.M.; Neilsen, W.A. y Medhurst, J.L. 1997. Thinning and pruning eucalypt plantations for sawlog production in Tasmania. *Tasforest*, 9: 15-34
- Gillespie, A.R.; Allen, H.L. y Vose, J.M. 1994. Amount and vertical distribution of foliage of young loblolly pine trees as affected by canopy position and silvicultural treatment. *Canadian Journal of Forest Research*, 24: 1337-1344.
- Glass, B.P. y McKenzie, H.M. 1989. Decay distribution in relation to pruning and growth stress in plantation-grown *Eucalyptus regnans* in New Zealand. *New Zealand Journal of Forest Science*, 19: 210-222.
- Gobierno del Principado de Asturias. 2001. Plan Forestal de Asturias. 109 pp.
- Gobierno del Principado de Asturias. 2009. Estrategia integral de prevención y lucha contra los incendios forestales en Asturias 2009-2012. 163 pp.
- Godin, C. y Sinoquet, H. 2005. Functional-structural plant modelling. *New Phytologist*, 166: 705-708.
- Gómez-García, E. 2009. Tarifa de cubicación con clasificación de productos para el abedul en Galicia. Trabajo de Investigación Tutelado (D.E.A.). Escuela Politécnica Superior de Lugo, Universidad de Santiago de Compostela.
- Gómez-García, E. 2011. Modelos dinámicos de crecimiento para rodales regulares de *Betula pubescens* Ehrh. y *Quercus robur* L. en Galicia. Tesis Doctoral. Escuela Politécnica Superior de Lugo, Universidad de Santiago de Compostela. 157 pp.
- González-Martínez, S.C. 2002. Estructura poblacional y flujo genético de *Pinus pinaster* Aiton en el noroeste de la Península Ibérica. *Ecosistemas*, 11(1): 1697-2473.
- González-Martínez, S.C.; Mariette, S.; Ribeiro, M.M.; Burban, C.; Raffin, A.; Chambel, M.R.; Ribeiro, C.A.M.; Aguiar, A.; Plomion, C.; Alía, R.; Gil, L.; Vendramin, G.G. y Kremer, A. 2004. Genetic resources in maritime pine (*Pinus pinaster* Aiton): molecular and quantitative measures of genetic variation and differentiation among maternal lineages. *Forest Ecology and Management*, 197: 103-115.
- Goulding, C.J. y Murray, J. 1976. Polynomial taper equations that are compatible with three volume equations. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 5: 313-322.
- Grace, J.C.; Blundell, W. y Pont, D. 1998. Branch development in *Pinus radiata* - model outline and data collection. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 28(2): 182-194.

- Grace, J.C.; Pont, D.C.; Goulding, C.J. y Rawley, B. 1999. Modelling branch development for forest management. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 29(3): 391-408.
- Graham, R.T.; Harvey, A.E.; Jain, T.B. y Tonn, J.R. 1999. The effects of thinning and similar stand treatments on fire behavior in western forests. Gen. Tech. Rep. PNWGTR-463. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station.
- Graham, R.T.; McCaffrey, S. y Jain, T.B. (Tech Ed.). 2004. Science basis for changing forest structure to modify wildfire behavior and severity. RMRS-GTR-120. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 43 pp.
- Gray, H.R. 1956. The form and taper of forest tree stems. Imperial Forest Institute, Oxford. Paper 32. 78 pp.
- Gregoire, T.G.; Schabenberger, O. y Barrett, J.P. 1995a. Linear modelling of irregularly spaced, unbalanced, longitudinal data from permanent-plot measurements. *Canadian Journal of Forest Research*, 25: 137-156.
- Gregoire, T.G.; Valentine, H.T. y Furnival, G.M. 1995b. Sampling methods to estimate foliage and other characteristics of individual trees. *Ecology*, 76: 1181-1194.
- Grote, R. 2002. Foliage and branch biomass estimation of coniferous and deciduous tree species. *Silva Fennica*, 36(4): 779-788.

H

- Hartley, H.O. 1961. The modified Gauss-Newton method for the fitting of nonlinear regression functions by least squares. *Technometrics*, 3: 269-280.
- Harvey, A.C. 1976. Estimating regression models with multiplicative heteroscedasticity. *Econometrica*, 44: 461-465.
- Hasenauer, H. 2006. Concepts within tree growth modeling. En: Hasenauer, H. (Ed.). Sustainable forest management. Growth models for Europe. Springer-Verlag, Berlin. pp. 3-17.
- Hasenauer, H. y Monserud, R.A. 1996. A crown ratio model for Austrian forest. *Forest Ecology and Management*, 84: 49-60.
- Hasenauer, H. y Monserud, R.A. 1997. Biased predictions for tree height increment models developed from smoothed 'data'. *Ecological Modelling*, 98: 13-22.
- Hendrickson, O.Q.; Chatarpaul, L. y Robinson, J.B. 1985. Effects of two methods of timber harvesting on microbial processes in forest soils. *Soil Science Society of America Journal*, 49: 739-746.
- Henttonen, H. 1990. Variation in the diameter growth of Norway spruce in Southern Finland. Doctoral Thesis, University of Helsinki, Helsinki. 88 pp.
- Herman, E.R. 1964. Epicormic branching of Sitka spruce. USDA Forest Service Pacific Northwest Research Station Research Paper PNW-RP-18. 9 pp.
- Hingston, R.A. 1990. Chemical control of epicormic shoots on 4 year old *Pinus radiata* D. Don. *Australian Forestry*, 53(1): 3-6.
- Hökkä, H. y Groot, A. 1999. An individual-tree basal area growth model for black spruce in second-growth peatland stands. *Canadian Journal of Forest Research*, 29: 621-629.

- Huang, S. 2002. Validating and localizing growth and yield models: procedures, problems and prospects. En: Proceedings of IUFRO "Workshop on reality, models and parameter estimation - the forestry scenario". Sesimbra (Portugal), 2-5 June 2002. 29 pp.
- Huang, S.; Yang, Y. y Wang, Y. 2003. A critical look at procedures for validating growth and yield models. En: Reed, D. y Soares, P. (Eds.). *Modelling Forest Systems*. CAB International, Wallingford, UK. pp. 271-293.
- Hubert, M. y Courraud, R. 1994. *Poda y formación de los árboles forestales*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. 300 pp.
- Husch, B.; Miller, C.I. y Beers, T.W. 1982. *Forest mensuration*. Krieger Publishing Company, Malabar, Florida. 402 pp.
- Hynynen, J. 1995. Predicting the growth response to thinning for Scots pine stands using individual tree growth models. *Silva Fennica*, 29(3): 225-246.

I

- ICONA. 1973. *Inventario Forestal Nacional*, Oviedo. Ministerio de Agricultura. Madrid. 70 pp.
- Ikonen, V-P. 2008. *Modelling the growth and properties of stem and wood of Scots pine (Pinus sylvestris L.) as related to silvicultural management with implications for sawing yield and properties of sawn pieces*. Doctoral Thesis. Faculty of Forest Sciences, University of Joensuu.
- Inglis, C.S. y Cleland, M.R. 1982. Predicting final branch size in thinned radiata pine stands. *Rotorua, FRI. Bulletin*, 3. 17 pp.
- Ishii, H.; David-Ford, E. y Elaine-Dinnie, C. 2002. The role of epicormic shoot production in maintaining foliage in old *Pseudotsuga menziesii* (Douglas-fir) trees II. Basal reiteration from older branch axes. *Canadian Journal of Botany*, 80(9): 916-926.
- Ishii, H. y Ford, E.D. 2001. The role of epicormic shoot production in maintaining foliage in old *Pseudotsuga menziesii* (Douglas-fir) trees. *Canadian Journal of Botany*, 79(3): 251-264.
- Ishii, H. y McDowell, N. 2002. Age-related development of crown structure in coastal Douglas-fir trees. *Forest Ecology and Management*, 169(3): 257-270.

J

- James, R.N.; Tustin, J.R. y Sutton, W.R.J. 1970. Forest Research Institute symposium on thinning and pruning. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 15: 25-56.
- Jayawickrama, K.J.S.; Shelbourne, C.J.A. y Carson, M.J. 1997. New Zealand's long internode breed of *Pinus radiata*. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 27: 126-141.
- Jenkins, J.C.; Chojnacky, D.C.; Heath, L.S. y Birdsey, R.A. 2003. National-scale biomass estimators for the United States tree species. *Forest Science*, 49: 12-35.
- Jerez, M.; Dean, T.; Cao, Q. y Roberts, S. 2005. Describing leaf area distribution in Loblolly Pine trees with Johnson's SB function. *Forest Science*, 51(2): 93-101.
- Jokela, E.J.; Van Grup, K.P.; Briggs, R.D. y White, E.H. 1986. Biomass estimation equations for Norway spruce in New York. *Canadian Journal of Forest Research*, 16: 413-415.

Jurgensen, M.F.; Harvey, A.E.; Graham, R.T.; Page-Dumroese, D.S.; Tonn, J.R.; Larsen, M.J. y Jain, T.B. 1997. Impacts of timber harvesting on soil organic matter, nitrogen, productivity, and health of inland Northwest forests. *Forest Science*, 43: 234-251.

K

Kalabokidis, K.D. y Omi, P.N. 1998. Reduction of fire hazard through thinning/residue disposal in the urban interface. *International Journal of Wildland Fire*, 8(1): 29-35.

Karani, P.K. 1978. Pruning and thinning in a *Pinus patula* stand at Lendu Plantation, Uganda. *Commonwealth Forestry Review*, 57: 269-278.

Keane, R.E.; Reinhardt, D.; Scott, J.; Gray, K. y Reardon, J. 2005. Estimating forest canopy bulk density using six indirect methods. *Canadian Journal of Forest Research*, 35(3): 724-739.

Keeves, A. y Douglas, D.R. 1983. Forest fires in South Australia on 16 February 1983 and consequent future forest management aims. *Australian Forestry*, 46: 148-162.

Kerr, G. y Harmer, R. 2001. Production of epicormic shoots on oak (*Quercus robur*): effects of frequency and time of pruning. *Forestry*, 74(5): 467-477.

Ketterings, Q.M.; Coe, R.; Noordwijk, M.v.; Ambagau, Y. y Palm, C.A. 2001. Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting above-ground tree biomass in mixed secondary forests. *Forest Ecology and Management*, 146: 199-209.

Keyes, C. y O'Hara, K. 2002. Quantifying stand target for silvicultural prevention of crown fires. *Western Journal of Applied Forestry*, 17: 101-109

Kiviste, A.; Álvarez-González, J.G.; Rojo-Alboreca, A. y Ruiz-González, A.D. 2002. Funciones de crecimiento de aplicación en el ámbito forestal. Monografías INIA: Forestal, 4. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria, Madrid.

Kiviste, A.K. 1988. Mathematical functions of forest growth. *Growth*, 29: 233-238.

Knowles, R. y Kimberley, M. 1992. The effects of site stocking and genetics on second-log branching in *Pinus radiata*. Forest Research Institute FRI. New Zealand Forest Service. Report, 33.

Knowles, R.L.; West, G.G. y Koehler, R. 1987. Predicting DOS in pruned stands of radiata pine. Ministry of Forestry, FRI Bulletin, 12.

Koehler, A.R. 1984. Variable lift pruning of radiata pine. New Zealand Forest Service, FRI Bulletin, 78.

Kozak, A. 1969. Taper functions and their applications in forest inventory. *Forestry Chronicle*, 45(4): 278-283.

Kozak, A. 1970. Methods of ensuring additivity of biomass components by regression analysis. *Forestry Chronicle*, 46: 402-404.

Kozak, A. 1988. A variable-exponent taper equation. *Canadian Journal of Forest Research*, 18(11): 1363-1368.

Kozak, A. 1997. Effects of multicollinearity and autocorrelation on the variable-exponent taper functions. *Canadian Journal of Forest Research*, 27: 619-629.

Kozak, A. 2004. My last words on taper equations. *Forestry Chronicle*, 80(4): 507-515.

- Kozak, A. y Kozak, R.A. 2003. Does cross validation provide additional information in the evaluation of regression models? *Canadian Journal of Forest Research*, 33: 976-987.
- Kozak, A.; Munro, D.D. y Smith J.H.G. 1969. Taper functions and their application in forest inventory. *Forestry Chronicle*, 45: 1-6.
- Kozłowski, T.T. y Pallardy, S.C. 1997. *Physiology of Woody plants*. 2nd Ed. Academic Press, San Diego, Calif.
- Krumland, B. y Wensel, L. 1988. A generalized height-diameter equation for Coastal California Species. *Western Journal of Applied Forestry*, 3(4): 113-115.
- Kruskal, W. y Wallis, W.A. 1952. Use of ranks on one criterion variance analysis. En: *Journal of the American Statistical Association*, 47: 583-621.
- Kurtz, V.D. y Ferruchi, R. 2000. La poda como parte de la estrategia para la obtención de madera de calidad. XV Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia (E.R.), Argentina. pp. B2-1:B2-23.
- Kurtz, V.D. y Ferruchi, R. 2004. Poda forestal. Cartilla técnica, 2. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Estación Experimental Agropecuaria Montecarlo. Agencia de extensión rural Eldorado. Abril, 2004. INTA. 16 pp.

L

- Laasasenaho, J. 1982. Taper curve and volume functions for pine, spruce, and birch. *Commun. Inst. For. Fenn.* 108. The Finnish Forest Research Institute. 74 pp. ISBN 9514005899 y 9789514005893.
- Laiho, R. y Laine, J. 1997. Tree stand biomass and carbon content in an age sequence of drained pine mires in southern Finland. *Forest Ecology and Management*, 93: 161-169.
- Lambert, M.C.; Ung, C.H. y Raulier, F. 2005. Canadian national tree aboveground biomass. *Canadian Journal of Forest Research*, 35: 1996-2018.
- Lamloom, S.H. y Savidge, R.A. 2003. A reassessment of carbon content in wood: variation within and between 41 North American species. *Biomass Bioenergy*, 25: 381-388.
- Landeras, E.; García, P.; Fernández, Y.; Braña, M.; Fernández-Alonso, O.; Méndez-Lodos, S.; Pérez-Sierra, A.; León, M.; Abad-Campos, P.; Berbegal, M.; Beltrán, R.; García-Jiménez, J. y Armengol, J. 2005. Outbreak of pitch canker caused by *Fusarium circinatum* on *Pinus* spp. in Northern Spain. *Plant Disease*, 88: 1015.
- Landsberg, J.J. y Waring, R.H. 1997. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *Forest Ecology and Management*, 95: 209-228.
- Lange, P.W.; De Ronde, C. y Bredenkamp, B.V. 1987. The effects of different intensities of pruning on the growth of *Pinus radiata* in South Africa. *South African Forestry Journal*, 143: 30-36.
- Långström, B. y Hellqvist, C. 1991. Effects of different pruning regimens on growth and sapwood area of Scots pine. *Forest Ecology and Management*, 44: 239-254.
- Lanner, R.M. 1985. On the insensitivity of height growth to spacing. *Forest Ecology and Management*, 13: 143-148.
- Larson, P.R. 1963. Stem form development of forest trees. *Forest Science Monograph*, 5: 1-42.

- Larson, P.R. 1965. Stem form of young larch as influenced by wind and pruning of forest trees. *Forest Science*, 11(4): 412-424.
- Laurance, W.F.; Fearnside, P.M.; Laurance, S.G.; Delamonica, P.; Lovejoy, T.E.; Rankin, J.M.; Chambers, J.Q. y Gascon, C. 1999: Relationship between soils and Amazon forest biomass: A landscape-scale study. *Forest Ecology and Management*, 118: 127-138.
- Lavery, P.B. y Mead, D.J. 1998. *Pinus radiata*: a narrow endemic from North America takes on the world. En: Richardson, D.M. (Ed.). *Ecology and Biogeography of Pinus*. Cambridge University Press. pp. 432-449.
- Lehtonen, A.; Mäkipää, R.; Heikkinen, J.; Sievänen, R. y Liski, J. 2004. Biomass expansion factors (BEFs) for Scots pine, Norway spruce and birch according to stand age for boreal forests. *Forest Ecology and Management*, 188: 211-224.
- Lemieux, H.; Samson, M. y Usenius, A. 1997. Shape and distribution of knots in a sample of *Picea abies* logs. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 12: 50-56.
- Lemoine, B.; Gelpe, J.; Ranger J. y Nys, C. 1986. Biomasses et croissance du pin maritime. Étude de la variabilité dans un peuplement de 16 ans. *Annals of Forest Science*, 43(1):67-84.
- Lessard, V.C.; McRoberts, R.E. y Holdaway, M.R. 2001. Diameter growth models using Minnesota forest inventory and analysis data. *Forest Science*, 47: 301-310.
- Lhotka, J.M. y Loewenstein, E.F. 2011 An individual-tree diameter growth model for managed uneven-aged oak-shortleaf pine stands in the Ozark Highlands of Missouri, USA. *Forest Ecology and Management*, 261(3): 770-778.
- Lindstrom, M.J. y Bates, D.M. 1990. Nonlinear mixed-effects models for repeated measures data. *Biometrics*, 46: 673-687.
- Linos, M.A., 1986. Funciones locales de biomasa (madera y corteza) para *Pinus radiata* D. Don. Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Agropecuarias y Forestales de la Universidad de Concepción para optar al título de Ingeniero Forestal. Chillan. Chile.
- Lombardero, M.J.; Vázquez-Mejuto, P. y Ayres, M.P. 2008. Role of plant enemies in the forestry of indigenous vs. non indigenous pines. *Ecological Applications*, 18(5): 1171-1181.
- López-Sánchez, C. y Rodríguez-Soalleiro, R. 2009. A Density Management Diagram Including Stand Stability and Crown Fire Risk for *Pseudotsuga Menziesii* (Mirb.) Franco in Spain. *Mountain Research and Development*, 29(2):169-176.
- López-Sánchez, C.A. 2009. Estado selvícola y modelos de crecimiento y gestión de plantaciones de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco en España. Tesis Doctoral. Escuela Politécnica Superior de Lugo, Universidad de Santiago de Compostela.
- López-Varela, B.; Ocaña-Bueno, L.; Lario-Leza, F.J.; Merino-García, A. y Rodríguez-Soalleiro, R. 2008. Relación estación-producción y estado nutricional de plantaciones jóvenes de *Pinus pinaster* Ait. en terrenos agrícolas abandonados en Galicia. En: Pardos, M.; Puértolas, J. (Eds.). *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 28: 237-243.
- Lückhoff, H.A. 1967. Pruning of *Eucalyptus grandis*. *Forestry in South Africa*, 8: 75-85.
- Lugo, A.E.; Cuevas, E. y Sánchez, M.J. 1990. Nutrients and mass litter and top soil of ten tropical tree plantations. *Plant Soil*, 125: 263-280.

Lyons, A. 1997. Pruned Stand Certification. Farm Forestry Information Sheets. Private Forests Tasmania. 3 pp. Disponible en [Consultado, 18/04/2012]:
<http://www.privateforests.tas.gov.au/files/active/0/24PrunedStandCertification.pdf>.

M

- Mabvurira, D. y Miina, J. 2002. Individual-tree growth model and mortality models for *Eucalyptus grandis* (Hill.) Maiden plantations in Zimbabwe. *Forest Ecology and Management*, 161: 231-245.
- MacFarlane, D.W.; Green, E.J.; Brunner, A. y Burkhart, H.E. 2002. Predicting survival and growth rates for individual loblolly pine trees from light capture estimates. *Canadian Journal of Forest Research*, 32: 1970-1983.
- Maclaren, J.P. 1993. Radiata pine growers manual. New Zealand Ministry of Forestry. Forest Research Institute (FRI). Bulletin, 184. 140 pp.
- Madrigal, A.; Fernández-Cavada, J.L.; Ortuño, S.F. y Notario, A. 1999. El sector forestal español. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Ed. Fundación Conde del Valle Salazar. Madrid. 125 pp.
- Madrigal, A. y Martínez-Millán, F.J. 1992. Alternativas selvícolas del *Pinus pinaster* Ait. en Galicia. Premio ENCE de investigación Forestal 1992 (inédito).
- Madrigal, J.; Hernando, C.; Guijarro, M.; Díez, C. y Jiménez, E. 2006. Distribución de biomasa y fijación de carbono tras clareos mecanizados intensos en regenerado post-incendio de *Pinus pinaster* Ait. (Monte «Fraguas», Guadalajara, España). *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 15(2): 231-242.
- Maguire, D.A.; Kershaw, J.A. y Hann, D.W. 1991. Predicting the effects of silvicultural regime on branch size and crown wood core in Douglas fir. *Forest Science*, 37(5): 1409-1428.
- Maguire, D.A. y Petruncio, M.D. 1995. Pruning and growth of western Cascade species: Douglas-fir, Western hemlock and Sitka spruce. En: Hanley, D.P.; Oliver, C.D.; Maguire, D.A.; Briggs, D.G. y Fight, R.D. (Eds.). *Forest pruning and wood quality of western North American conifers*. Inst. For. Resour. College of Forest Resources, University of Washington, Seattle, Wash. Contribution, 77: 179-215.
- Majid, N.M. y Paudyal, B.K. 1992. Pruning trial for *Acacia mangium* Wildlife plantation in Peninsular Malaysia. *Forest Ecology and Management*, 47: 285-293.
- Makinen, H. 1999. Growth, suppression, death, and self-pruning of branches of Scots pine in southern and central Finland. *Canadian Journal of Forest Research*, 29: 585-594.
- Mansilla, P.; Aguin, O.; Pintos, C. y González, M^a. 2005. *Fusarium circinatum* Nirenberg & O'Donnell. Cancro resinoso del pino. Estación Fitopatológica de Arriero, Servicio Agrario. Excm. Diputación Provincial de Pontevedra. Ficha 32. 4 pp.
- Martens, S.N.; Ustin, S.L. y Rousseau, R.A. 1993. Estimation of tree canopy leaf area index by gap fraction analysis. *Forest Ecology and Management*, 61: 91-108.
- Martin, G.L. y Ek, A.R. 1984. A comparison of competition measures and growth models for predicting plantation red pine diameter and height growth. *Forest Science*, 30: 731-733.
- Martín-Albertos, S.; Díaz-Fernández, P.M. y De Miguel, J. 1998. Regiones de procedencia de especies forestales españolas. Descripción y principales características; géneros

- Abies, Fagus, Pinus* y *Quercus*. Organismo Autónomo de Parques Nacionales. Madrid. 22 pp. + 15 fichas.
- Martínez-Cortizas, A.; Castillo-Rodríguez, F.; Blanco-Chao, R. y Pérez-Alberti, A. 1997. Relieve costero, dinámica atmosférica y gradientes pluviométricos en el noroeste de la Península Ibérica. Actas del XV Congreso de Geógrafos Españoles. Dinámica litoral-interior: 137-155. Asociación de Geógrafos Españoles. Servicio de Publicaciones e Intercambio Científico da Universidade de Santiago de Compostela. Santiago de Compostela.
- Mason, E.G. 2005. A brief review of the impact of stand density on variables affecting radiata pine stand value. University of Canterbury, Christchurch, New Zealand. Disponible en [Consultado, 10/03/2006]: <http://www.fore.canterbury.ac.nz/>.
- Matthews, G. 1993. The carbon content of trees. Forestry Commission Technical Paper 4. Forestry Commission, Edinburgh.
- Max, T. y Burkhart, H. 1976. Segmented polynomial regression applied to taper equations. Forest Science, 22: 283-289.
- Medhurst, J. y Beadle, C. 2000. Thinning for solid wood in *Eucalyptus nitens* plantations. En: Henderson, L.; Waugh, G.; Nolan, G. y Bennett, P. (Eds.). Proceedings of the Future of Eucalypts for Wood Products. Proceedings of IUFRO Conference, Launceston, Australia. pp. 343-348.
- Melillo, J.M.; Hall, D.O. y Ågren, G.I. 1996. Executive summary. En: Breymeyer, A.; Hall, D.O.; Melillo, J.M. y Ågren, G.I. (Eds.). Global Change: Effects on Forests and Grasslands, John Wiley. New York, NY, USA. pp. 1-16.
- Menalled, F.D. y Kelty, M.J. 2001. Crown structure and biomass allocation strategies of three juvenile tropical tree species. Plant Ecology, 152: 1-11.
- Meneses, M. y Guzman, S. 2000. Análisis de la eficiencia de la silvicultura destinada a la obtención de madera libre de nudos en plantaciones de pino radiata en Chile. Bosque, 21(2): 85-93.
- Merino, A. y Edeso, J.M. 1999. Soil fertility rehabilitation in young *Pinus radiata* D. Don. plantations from northern Spain after intensive site preparation. Forest Ecology and Management, 116: 83-91.
- Merino, A.; Rey, C.; Brañas, J. y Rodríguez-Soalleiro, R. 2003. Biomasa arbórea y acumulación de nutrientes en plantaciones de *Pinus radiata* D. Don en Galicia. Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales, 12: 85-98.
- Methol, R. 2002. Evaluación de la intensidad de poda en el crecimiento de rodales de *Eucalyptus grandis*. Programa Nacional Forestal. Serie de Actividades de Difusión. Uruguay, 303: 14-20.
- Meyers, S.P. 1995. Profit potencial from pruning: A look from down Under. The economics of commercial pruning and certification in New Zealand. 14 pp. Disponible en [Consultado, 20/05/2009]: <https://fp.auburn.edu/sfws/sfnmc/class/pruning.html>
- Michalek, A.J.; Lockhart, B.R.; Lowe, M.W. y Williams, R.A. 2004. Diameter-growth and epicormic branching response of an east Texas bottomland red oak stand 3 years after thinning and fertilization. pp. 269-275 En: Connor, K.F. (Ed.). Proceedings of the 12th biennial southern silvicultural research conference. Gen. Tech. Rep. SRS-71. Asheville,

- NC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station. 594 pp.
- Michel-Rodríguez, M. 2003. El pino radiata (*Pinus radiata* D. Don) en la historia forestal de la Comunidad Autónoma del País Vasco: análisis de un proceso de forestalismo intensivo. Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Universidad Politécnica de Madrid.
- Miina, J. 1993. Residual variation in diameter growth in a stand of Scots pine and Norway spruce. *Forest Ecology and Management*, 58: 111-128.
- Millar, J.A. 2003. Análisis del crecimiento diametral de ramas de *Pinus radiata* D. Don en distintos sitios, entre las Regiones VII y IX. Tesis de Ingeniería Forestal. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile, Valdivia.
- Miller, L.H. 1956. Tables of percentage points of Kolmogorov statistics. *Journal of the American Statistical Association*, 51: 111-121.
- MIMAM. 2003. Mapa Forestal de España 1:50.000. Dirección General de Conservación de la Naturaleza. Ministerio de Medio Ambiente.
- Mitsopoulos, I.D. y Dimitrakopoulos, A.D. 2007. Canopy fuel characteristics and potential crown fire behaviour in Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) forests. *Annals of Forest Science*, 64: 287-299.
- Mohammed, C.; Barry, K.; Battaglia, M.; Beadle, C.L.; Eyles, A.; Mollon, A. y Pinkard, E.A. 2000. Pruning-associated stem defects in plantation *E. nitens* and *E. globulus* grown for sawlog and veneer in Tasmania, Australia. En: *The Future of Eucalypts for Wood Products*. International Union of Forest Research Organisations Conference Proceedings, Launceston, Australia.
- Molina, F. y Ruiz Zorrilla, P. 1976. Tablas de producción de *Pinus pinaster* Ait. en Galicia. INIA, CRIDA 01. Departamento Forestal de Lourizán, Pontevedra (inédito).
- Mønness, E.N. 1982. Diameter distributions and height curves in even-aged stands of *Pinus sylvestris* L. Meddelelser fra. Norsk Institutt For Skogforskning. Reports of the Norwegian Forest Research Institute, 36(15). 45 pp.
- Monserud, R.A. 1986. Time-series analyses of tree-ring chronology. *Forest Science*, 32(2): 349-372.
- Monserud, R.A. y Marshall, J.D. 1999. Allometric crown relations in three Northern Idaho conifer species. *Canadian Journal of Forest Research*, 29: 521-535.
- Monserud, R.A. y Sterba, H. 1996. A basal area increment model for individual trees growing in even- and uneven-aged forest stands in Austria. *Forest Ecology and Management*, 80: 57-80.
- Montagu, K.D.; Kearney, D.E. y Smith, R.G.B. 2003. The biology and silviculture of pruning planted eucalypts for clear wood production – a review. *Forest Ecology and Management*, 179: 1-13.
- Montero, F.; Ortega, C.; Cañellas, I. y Bachiller, A. 1999. Productividad aérea y dinámica de nutrientes en una repoblación de *Pinus pinaster* Ait. sometida a distintos regímenes de claras. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, Fuera de serie(1): 175-206.
- Montero, G.; Muñoz, M.; Donés, J. y Rojo, A. 2004. Fijación de CO₂ por *Pinus sylvestris* L. y *Quercus pyrenaica* Willd. en los montes <<Pinar de Valsain>> y <<Matas de Valsain>>. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 13(2): 399-415.

- Montero, G.; Ruiz-Peinado, R. y Muñoz, M. 2005. Producción de biomasa y fijación de CO₂ por los bosques españoles. Monografías INIA. Serie Forestal, 13. 220 pp. ISBN: 978-84-7498-512-2.
- Montes, F. 1990. Naturaleza asturiana. Ayalga Ediciones. Asturias.
- Montoya, J.M. 1996. La poda de los árboles forestales. Ed. Mundi-Prensa. 3ª Edición. 86 pp.
- Montoya, J.M. y Mesón, M. 2004. Silvicultura. Tomo II. Coedición Fundación Conde del Valle Salazar. Ed. Mundi-Prensa. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes de Madrid. Madrid. 575 pp.
- Moore, J. 1994. Evidence of links between nutrition and forest health. En: Intermountain Forest Tree Nutrition Cooperative. 1994, April.12, Spokane, WA. Annual Meeting. Moscow, ID. University of Idaho. pp. 53-62.
- Mosquera-Losada, M.R.; Freese, D. y Rigueiro-Rodríguez, A. 2011. Carbon Sequestration in European Agroforestry Systems. En: Kumar, B.M. y Nair, P.K.R. (Eds.). Carbon Sequestration Potential of Agroforestry Systems: Opportunities and Challenges, Advances in Agroforestry, 8. Springer Science+Business Media B.V. ISBN 978-94-007-1630-8. pp. 43-59.
- Muhairwe, C.; Lemay, V. y Kozak, A. 1994. Effects of adding tree, stand, and site variables to Kozak's variable-exponent taper equation. Canadian Journal of Forest Research, 24: 252-259.
- Muhairwe, C.K. 1994. Tree form and taper variation over time for interior lodgepole pine. Canadian Journal of Forest Research, 24: 1904-1913.
- Muhairwe, C.K. 1999. Taper equations for *Eucalyptus pilularis* and *Eucalyptus grandis* for the north cost in New South Wales, Australia. Forest Ecology and Management, 113: 251-269.
- Muñoz, F.; Espinosa, M.; Herrera, M.A. y Cancino, J. 2005. Características del crecimiento en diámetro, altura y volumen de una plantación de *Eucalyptus nitens* sometida a tratamientos silvícolas de poda y raleo. Universidad Austral de Chile, Chile. Bosque, 26(1): 93-99.
- Muñoz, F.; Rubilar, R.; Espinosa, M.; Cancino, J.; Toro, J. y Herrera, M. 2008. The effect of pruning and thinning on above ground aerial biomass of *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Maiden. Forest Ecology and Management, 255(3-4): 365-373.
- Muñoz, J.A. 1998. Mejoramiento de productividad de plantaciones de pino radiata y eucaliptos en Forestal Mininco S.A. (Chile). Informe Técnico. Forestal Mininco S.A. Gerencia de Silvicultura y Patrimonio. Superintendencia de Establecimiento de Plantaciones. Dpto. de Productividad de Sitios.
- Muñoz-Riveros, C.; Cancino, J. y Espinosa, M. 2005. Análisis de biomasa del vuelo de un rodal adulto de *Pinus radiata*. Bosque, 26(3): 33-44.
- Myers, C.A. 1963. Vertical distribution of annual increment in thinned ponderosa pine. Forest Science, 9: 394-404.
- Myers, R.H. 1990. Classical and modern regression with applications. 2nd Edition. Duxbury Press, Belmont, California.

N

- Neilsen, W.A. y Pinkard, E.A. 2003. Effects of green pruning on growth of *Pinus radiata*. Canadian Journal of Forest Research, 33(11): 2067-2073.
- Neter, J.; Kutner, M.H.; Nachtsheim, C.J. y Wasserman, W. 1996. Applied linear statistical models (4th Edition). McGraw-Hill, New York.
- Newnham, R. 1988. A variable-form taper function. Information Report PI-X-83. Petawawa National Forest Institute. Forestry Canada. 33 pp.
- Newnham, R. 1990. Mesure du défilement de forme variable. Forêts Canada. Institut Forestier National de Petawawa. Rapport d'information PI-X-83-F. 31 pp.
- Newnham, R. 1992. Variable-form taper functions for four Alberta tree species. Canadian Journal of Forest Research, 22: 210-223.
- Nord-Larsen, T. 2006. Modeling individual-tree growth from data with highly irregular measurement intervals. Forest Science, 52: 198-208.
- Novo, N.; Rojo, A. y Álvarez-González, J.G. 2003. Funciones de perfil del tronco y tarifas de cubicación con clasificación de productos para *Pinus sylvestris* L. en Galicia. Investigación Agraria. Sistemas y Recursos Forestales, 12(1): 123-136.
- Nunes, L.; Patrício, M.; Tomé, J. y Tomé, M. 2011. Modelling dominant height growth of maritime pine in Portugal using GADA methodology with parameters depending on soil and climate variables. Annals of Forest Science, 68 (2): 311-323.
- Nutto, L. y Touza, M.C. 2004 Producción de Madera de Sierra de alta calidad con *Eucalyptus globulus*: CIS madera: Revista del Centro de Innovación y Servicios Tecnológicos de la Madera, 12: 6-18.
- Nutto, L.; Touza, M.C. y Delgado, J.L. 2003. Producción de Madera de Calidad de Eucalipto. La poda-Conocimientos Fundamentales y Técnicas. Revista CIS-Madera, 11(2º Semestre 2003): 35-45.
- Nyström, K. y Kexi, M. 1997. Individual tree basal area growth models for young stands of Norway spruce in Sweden. Forest Ecology and Management, 97: 173-185.

O

- O'Grady, A.P.; Worledge, D. y Battaglia, M. 2006. Above- and below-ground relationships, with particular reference to fine roots, in a young *Eucalyptus globulus* (Labill.) stand in southern Tasmania. Trees, 20: 531-538.
- O'Hara, K.L. 1989. Forest pruning bibliography. University of Washington, Institute of Forest Resources, Contribution, 67. 74 pp.
- O'Hara, K.L. 1991. A biological justification for pruning in coastal Douglas-fir stands. Western Journal of Applied Forestry, 6(3): 59-63.
- O'Hara, K.L. 2007. Pruning wounds and occlusion: A long-standing conundrum in forestry. Journal of Forestry, 105(3): 8 pp.
- O'Hara, K.L. y Berrill, J.P. 2009. Epicormic sprout development in pruned coast redwood: pruning severity, genotype, and sprouting characteristics. Annals of Forest Science, 66: 409-418.
- O'Hara, K.L. y Buckland, P.A. 1996. Prediction of pruning wound occlusion and defect core size in ponderosa pine. Western Journal of Applied Forestry, 11: 40-43.

- O'Hara, K.L.; Parent, D.R. y Hagle, S.K. 1995. Pruning Eastern cascade and northern Rocky Mountain species: biological opportunities. En: Hanley, D.P.; Oliver, C.D.; Maguire, D.A.; Briggs, D.G. y Fight, R.D. (Eds.). Forest pruning and wood quality of western North American conifers. Inst. For. Resour. College of Forest Resources, University of Washington, Seattle, Wash. Contrib., 7. pp. 216-237.
- O'Hara, K.L. y Valappil, N. 2000. Epicormic sprouting of pruned western larch. Canadian Journal of Forest Research, 30: 324-328.
- O'Hara, K.L.; York, R.A. y Heald, R.C. 2008. Effect of pruning severity and timing of treatment on epicormic sprout development in giant sequoia. Forestry, 81(1): 103-110.
- Oliva, J. y Colinas, C. 2007. Decline of silver fir (*Abies alba* Mill.) stands in the Spanish Pyrenees: Role of management, historic dynamics and pathogens. Forest Ecology and Management, 252: 84-97.
- Olivares, P.B. y Meneses, M. 1985. Diseño de un simulador de poda *Pinus radiata*. Investigación en Chile. Valdivia, Chile. Tomo II: 76-85.
- Olivares, P.B. y Meneses, M. 1992. Predicción del tamaño del cilindro con defectos y estimación del rendimiento de madera aserrada libre de nudos. *Pinus radiata* - Investigación en Chile. UACH. Valdivia, Chile. Silvicultura, Manejo y Tecnología: 87-108.
- Oliver, C.D. y Larson, B.C. 1996. Forest stand dynamics (Update edition). New York, USA. John Wiley and Sons. 520 pp.
- Ormerod, D. 1973. A simple bole model. Forestry Chronicle, 49: 136-138.
- Orozco, E. y Jordán, E. 2011. Influencia de la intensidad de poda sobre el desarrollo epidémico de *Pinus halepensis* Mill. FORESTA. Especial Castilla-La Mancha, 47-48: 100-105.
- Ouro, G.; Pérez-Batallón, P. y Merino, A. 2000. Dinámica de nutrientes en una plantación de *Pinus radiata* D. Don en Galicia. Congreso de Ordenación y Gestión Sostenible de Montes. Santiago de Compostela (España). 4-9 de octubre de 1999.

P

- Palahí, M. y Grau, J.M. 2003. Preliminary site index model and individual tree and mortality models for black pine (*Pinus nigra* Arn.) in Catalonia (Spain). Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales, 12: 137-148.
- Palahí, M.; Pukkala, T.; Miina, J. y Montero, G. 2003. Individual-tree growth and mortality models for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in north-east Spain. Annals of Forest Science, 60: 1-10.
- Palazuelos, S. 1995. Análisis del diámetro de cilindro defectuoso en árboles podados de *Pinus radiata* D. Don en la Precordillera andina de la VIII Región. Trabajo Ing. Forestal. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad de Chile.
- Pardé, J. 1980. Forest biomass. Forestry Abstracts, 41: 343-362.
- Pardé, J. y Bouchon, J. 1994. Dasometría. Paraninfo, Madrid. 387 pp.
- Park, J.C. 1980. A grade index for pruned butt logs. New Zealand Journal of Forestry Science, 10(2): 419-438.
- Park, J.C. 1982. Occlusion and the defect core in pruned radiata pine. New Zealand Journal of Forestry, Forest Research Institute, Rotorua, New Zealand. FRI Bulletin, 2: 1-15.

- Park, J.C. 1985. Recovery of clear lengths from pruned *Pinus radiata* sawlogs. New Zealand Journal of Forestry Science, 15(2): 207-222.
- Park, J.C. 1994. Evaluating pruned saw-log quality and assessing sawmill recoveries in New Zealand. Forest Products Journal, 44(4): 43-52.
- Parresol, B.R. 1999. Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisons. Forest Science, 45: 573-593.
- Parresol, B.R. 2001 Additivity of nonlinear biomass equations. Canadian Journal of Forest Research, 5: 865-878.
- Parresol, B.R.; Hotvedt, J.E. y Cao, Q.V. 1987. A volume and taper prediction system for bald cypress. Canadian Journal of Forest Research, 17: 250-259.
- Pasalodos-Tato, M.; Pukkala, T. y Castedo-Dorado, F. 2009. Models for the optimal management of *Pinus radiata* D. Don in Galicia (north-western Spain) under risk of fire. Allgemeine Forst und Jagdzeitung, 180(11/12): 238-249.
- Paulo, J.A.; Tomé, J. y Tomé, M. 2003. Ajustamento simultâneo de equações de biomassa de azinheira. En: Brito, P.; Figueiredo, A.; Sousa, F.; Teles, P. Y Rosado, F. (Eds). Literacia e Estatística. Actas do X Congresso Anual da Sociedade Portuguesa de Estatística (SPE), Porto. pp. 501-510.
- Peltola, H.; Miina, J.; Rouvinen, I. y Kellomäki, S. 2002. Effect of early thinning on the diameter growth distribution along the stem of Scots pine. Silva Fennica, 36(4): 813-825.
- Pérez, D.; Burkhardt, H.E. y Stiff, C. 1990. A variable-form taper function for *Pinus oocarpa* Schiede. in Central Honduras. Forest Science, 36: 186-191.
- Pérez, J.E. y Vázquez, J.M. 1994. Nuestros árboles. Servicio de Publicaciones Principado de Asturias. Asturias, Mieres.
- Pérez-Batallón, P.; Ouro, G.; Macías, F. y Merino, A. 2001. Initial mineralization of organic matter in a forest plantation soil following logging residue management techniques. Annals of Forest Science, 58: 807-818.
- Pérez-Cruzado, C. 2009. Herramientas de gestión para plantaciones de *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Maiden con el objetivo de fijación de carbono. Trabajo de Investigación Tutelado (D.E.A.). Escuela Politécnica Superior de Lugo, Universidad de Santiago de Compostela.
- Pérez-Cruzado, C.; Fernández-Rivas, E.; Rodríguez-Dacosta, L.M.; Merino, A.; Álvarez-González, J.G. y Rodríguez-Soalleiro, R. 2009. Ecuaciones de biomasa aérea de árbol individual para *Eucalyptus nitens* Maid. para el norte de España. Estimación de los errores cometidos mediante su aplicación a nivel de rodal. Ref: 5CFE01-228. 5º Congreso Forestal Español. Montes y sociedad: Saber qué hacer. Ávila, 21 a 25 de septiembre de 2009.
- Pérez-Cruzado, C. y Rodríguez-Soalleiro, R. 2011. Improvement in accuracy of aboveground biomass estimation in *Eucalyptus nitens* plantations: Effect of bole sampling intensity and explanatory variables. Forest Ecology and Management, 261(11): 2016-2028.
- Pérez-Sierra, A.; Landeras, E.; Leon, M.; Berbegal, M.; Garcia-Jimenez, J. y Armengol, J. 2007. Characterization of *Fusarium circinatum* from *Pinus* spp. in northern Spain. Mycological Research, 111(7): 832-839.

- Perry, D. 1994. Forest ecosystem. Baltimore, USA. The Johns Hopkins University Press. 649 pp.
- Perry, D.A. 1985. The competition process in forest stands. En: Cannel, M.G.R. y Jackson, J.E. (Eds.). Trees as crop plants. Institute of Terrestrial Ecology, Natural Environment Research Council. pp. 481-506.
- Persson, O.A. 1992. A growth simulator for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in Sweeden. Swedish University of Agricultural Sciences, Dpto. of Forest Yield Research. Report, 31. 205 pp.
- Perttunen, J.; Sievanen, R.; Nikinmaa, E.; Salminen, H.; Saarenmaa, H. y Vakeva, J. 1996. LIGNUM: A tree model based on simple structural units. Annals of Botany, 77: 87-98.
- Peterson, D.L.; Johnson, M.C.; Agee, J.K.; Jain, T.B.; McKenzie, D. y Reinhardt, E.D. 2005. Forest structure and fire hazard in dry forests of the Western United States. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-628. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. 30 pp.
- Petruncio, M.; Briggs, D. y Barbour, R.J. 1997. Predicting pruned branch stub occlusion in young, coastal Douglas-fir. Canadian Journal of Forest Research, 27: 1074-1082.
- Pienaar, L.V. y Turnbull, R.J. 1973 The Chapman-Richards generalization of von Bertalanffy's growth model for basal area growth and yield in even-aged stands. Forest Science, 19(1): 2-22.
- Pindyck, R.S. y Rubinfeld, D.L. 1981. Econometric models and economic forecasts. 2nd Ed. McGraw-Hill, New York. 630 pp.
- Pinkard, E. y Neilsen, E. 2003. Crown and stand characteristics of *Eucalyptus nitens* in response to initial spacing: implications for thinning. Forest Ecology and Management, 172: 215-227.
- Pinkard, E.A. 2002. Effects of pattern and severity of pruning on growth and branch development of pre-canopy closure *Eucalyptus nitens*. Forest Ecology and Management, 157: 217-230.
- Pinkard, E.A. y Beadle, C.L. 1998a. Aboveground biomass partitioning and crown architecture of *Eucalyptus nitens* following green pruning. Canadian Journal of Forest Research, 1998: 28(9): 1419-1428.
- Pinkard, E.A. y Beadle, C.L. 1998b. Effects of green pruning on growth and stem shape of *Eucalyptus nitens* (Deane and Maiden) Maiden. New Forests, 15: 107-126.
- Pinkard, E.A. y Beadle, C.L. 2000. A physiological approach to pruning. International Forestry Review, 2: 295-305.
- Pinkard, E.A.; Mohammed, C.; Beadle, C.L.; Hall, M.F.; Worledge, D. y Mollon, A. 2004. Growth responses, physiology and decay associated with pruning plantation-grown *Eucalyptus globulus* Labill. and *E. nitens* (Deane and Maiden) Maiden. Forest Ecology and Management, 200: 263-277.
- Pitt, D.G. y Bell, F.W. 2004. Effects of stand tending on the estimation of aboveground biomass of planted juvenile white spruce. Canadian Journal Forest Research, 34: 649-658.
- Pollet, J. y Omi, P.N. 2002. Effect of thinning and prescribed burning on crown fire severity in ponderosa pine forests. International Journal of Wildland Fire, 11: 1-10.

- Pompa, M.; Corral-Rivas, J.J.; Díaz, M.A. y Martínez, M. 2009. Función de ahusamiento y volumen compatible para *Pinus arizonica* Engelm. en el suroeste de Chihuahua. *Ciencia Forestal en México*, 34(105, enero-junio de 2009): 119-136.
- Porté, A.; Bosc, A.; Champion, I. y Loustau, D. 2000. Estimating the foliage area of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) branches and crowns with application to modelling the foliage area distribution in the crown. *Annals of Forest Science*, 57 (1): 73-86.
- Porté, A.; Trichet, P.; Bert, D. y Loustau, D. 2002. Allometric relationships for branch and tree woody biomass of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.). *Forest Ecology and Management*, 158: 71-83.
- Prado, J.; Infante, P.; Arriaga, M. y Aguirre, S. 1987. Funciones de biomasa para seis especies arbustivas de la zona árida de Chile. *Ciencia e Investigación Forestal*, 1(2): 11-20.
- Pretzsch, H.; Biber, P.; Durský, J.; Gadow, K.v.; Hasenauer, H.; Kändler, G.; Kenk, G.; Kublin, E.; Nagel, J.; Pukkala, T.; Skovsgaard, J.P.; Sadtke, R. y Sterba, H. 2002. Recommendations for standardized documentation and further development of forest growth simulators. *Forstw. Cbl.*, 121(3): 138-151.
- Prieto, A. y Tolosana, E. 1991. Funciones de perfil para la cubicación de árboles en pie con clasificación de producto. *Comunicaciones I.N.I.A. Serie Recursos Naturales*, 58: 1-45.
- Private Forests Tasmania. 2004. Farm Forestry Series Radiata Pine Pruning for Clearwood. Disponible en [Consultado, 14/07/2006]: <http://www.privateforests.tas.gov.au>.
- Prodan, M.; Peters, R.; Cox, F. y Real, P. 1997. *Mensura Forestal*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). Costa Rica. 503 pp.
- Pukkala, T. 1989. Predicting diameter growth in even-aged Scots pine stands with a spatial and non-spatial model. *Silva Fennica*, 23(2): 101-116.

Q

- Quine, C.P. 2004. Development of epicormic sprouts on Sitka spruce stems in response to windthrown gap formation. *Forestry*, 77: 225-233.

R

- Raulier, F.; Ung, C-H.; Ouellet, D. y Ung, C.H. 1996. Influence of social status on crown geometry and volume increment in regular and irregular black spruce stands. *Canadian Journal of Forest Research*, 26: 1742-1753.
- Raven, P.H.; Evert, R.F. y Eichhorn S.E. 1987: *Biology of plants*. Worth Publishers Inc., New York. Disponible en [Consultado, 06/09/2012]: <http://www.whfreeman.com/Catalog/static/whf/raven/>.
- Rawlings, J.O.; Pantula, S.G. y Dickey, D.A. 1998. *Applied Regression Analysis: A Research Tool*. Springer. 657 pp.
- Rayachhetry, M.B.; Van, T.K.; Center, T.D. y Laroche, F. 2001. Dry weight estimation of the aboveground components of *Melaleuca quinquenervia* trees in southern Florida. *Forest Ecology and Management*, 142: 281-290.
- Real, P. y Moore, J. 1986. An individual tree system for Douglas-fir in the Inland-Northwest. *Proceedings of IUFRO Conference "Forest Growth Modelling and*

- Prediction”, Minneapolis, Minnesota. 23-27 August 1987. En: Ek, A.R.; Shifley, S.R. y Burk, T.E. (Eds.). USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. NC-120: 1037-1044.
- Reed, D.D. y Byrne, J.C. 1985. A simple, variable form volume estimation system. *Forestry Chronicle*, 61:87-90.
- Reed, D.D. y Green, E.J. 1985. A method of forcing additivity of biomass tables when using nonlinear models. *Canadian Journal of Forest Research*, 15: 1184-1187
- Reed, D.D.; Liechty, H.O.; Jones, E.A. y Zhang, Y. 1996. Above- and below ground dry matter accumulation pattern derived from dimensional biomass relationship. *Forest Science*, 42: 236-241.
- Reed, D.D.; Mroz, G.; Liechty, H.; Jones, E.; Cattelino, P.; Balster, N. y Zhang, Y. 1995. Above- and below-ground biomass of precompetitive red pine in northern Michigan. *Canadian Journal of Forest Research*, 25: 1064-1069.
- Reed, D.D. y Tomé, M. 1998. Total aboveground biomass and net dry matter accumulation by plant component in young *Eucalyptus globulus* in response to irrigation. *Forest Ecology and Management*, 103: 21-32.
- Reich, P.B.; Walters, M.B.; Krause, S.C.; Vanderklein, D.W.; Raffa, K.R. y Tabone, T. 1993. Growth, nutrition and gas exchange of *Pinus resinosa* following artificial defoliation. *Trees*, 7: 67-77.
- Reid, R. 2002. The principles and practice of pruning, *Australian Forest Grower*, Special Liftout, 60(Winter 2002), 25(2). 12 pp.
- Reid, R. y Stephen, P. 2001. The farmer’s forest: multipurpose forestry for Australian farmers. Australian Master Tree Grower Program, Department of Forestry, The Institute of Land & Food Resources, The University of Melbourne, Publication No. R01/33. Disponible en [Consultado, 14/07/2011]: http://www.mtg.unimelb.edu.au/publications/farmers_forest.htm.
- Reinhardt, E.D. y Crookston, N.L. 2003. The Fire and Fuels Extension to the Forest Vegetation Simulator. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-116. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 209 pp.
- Reinhardt, E.D. y Holsinger, L. 2010. Effects of fuel treatments on carbon-disturbance relationships in forests of the northern Rocky Mountains. *Forest Ecology and Management*, 259: 1427-1435.
- Reinhardt, E.D.; Keane, R.E. y Brown, J.K. 1997. First Order Fire Effects Model: FOFEM 4.0, user’s guide. USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. INT-344. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station. 65 pp.
- Reinhardt, E.D.; Lutes, D. y Scott, J. 2006a. FuelCalc: A Method for Estimating Fuel Characteristics. En: P.L. Andrews y B.W. Butler (Eds.). *Fuels Management-How to Measure Success: Conference Proceedings*: 273-282. USDA Forest Service RMRS-P-41.
- Reinhardt, E.D.; Scott, J.; Gray, K. y Keane, R. 2006b. Estimating canopy fuel characteristics in five conifer stands in the western United States using tree and stand measurements. *Canadian Journal of Forest Research*, 36: 2803-2814.
- Reukema, D.L. 1964. Some effects of freeze injury on development of Douglas-fir. *Northwest Science*, 38(1): 14-17.

- Rey, C.; Brañas, J.; Rodríguez, R. y Merino, A. 2001. Biomasa y acumulación de nutrientes en plantaciones de *Pinus radiata* D. Don del norte de España. III Congreso Forestal Español "Sierra Nevada 2001" Granada, España.
- Richards, F.J. 1959. A flexible growth function for empirical use. *Journal of Experimental Botany*, 10: 290-300.
- Riemer, T.; Gadow, K.v. y Slodoba, B. 1995. Ein Modell zur Beschreibung von Baumschäften. *Allg. Forst-und J.-Ztg*, 166(7): 144-147.
- Ritson, P. y Sochacki, S. 2003. Measurement and prediction of biomass and carbon content of *Pinus pinaster* trees in faro forestry plantations. *Forest Ecology and Management*, 175: 103-117.
- Robichaud, E. y Methven, I.R. 1992. The applicability of the pipe model theory for the prediction of foliage biomass in trees from natural, untreated black spruce stands. *Canadian Journal of Forest Research*, 22: 1118-1123.
- Roda, J.M. 2001. Form function for the 'I-214' poplar merchantable stem (*Populus x euramericana* (Dode) Guinier cv cultivar 'I-214'). *Annals of Forest Science*, 58: 77-87.
- Rodríguez, F. 2005. Modelos de producción de las choperas del Valle del Cinca. Tesis Doctoral. Universitat de Lleida. 212 pp.
- Rodríguez, F. y Molina, C. 2003. Análisis de modelos de perfil del fuste y estudio de la cilindridad para tres clones de chopo (*Populus x euramericana*) en Navarra. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 12(3): 73-85.
- Rodríguez, F.; Serrano L. y Aunós A. 2001. Influencia del método de poda sobre el perfil del árbol en una chopera de Luisa Avanzo con 8 años de edad, en el valle medio del Cinca (Huesca). *Actas I Simposio del Chopo*. Zamora, 9-11 de Mayo.
- Rodríguez, R. 2002. Effects of silvicultural regime on leaf, allome-try, growth allocation and productivity in *Pinus radiata* D. Don. Tesis de Doctorado en Ciencias Forestales. Concepción, Chile. Universidad de Concepción. 109 pp.
- Rodríguez, R.; Cueto, A.; Majada, J. y Benito, J.L. 2006. Silvicultura del pino insignie (*Pinus radiata*). Manual básico. Consejería de Medio Rural y Pesca, Instituto de Desarrollo Rural y Servicio de Montes y Producción Forestal. 55 pp.
- Rodríguez, R.; Majada, J.; Benito, J.L. y Braña, M. 2007. Silvicultura del pino pinaster (*Pinus pinaster*). Manual básico. Consejería de Medio Rural y Pesca, Instituto de Desarrollo Rural y Servicio de Montes y Producción Forestal. 87 pp.
- Rodríguez-Gutián, M.A. 2004. Aplicación de criterios botánicos para a proposta de modelos de xestión sustentable das masas arborizadas autóctonas do Subsector Galaico-Asturiano Septentrional. Tesis Doctoral inédita. Departamento de Producción Vexetal. Escola Politécnica Superior de Lugo. USC. 620 pp.
- Rodríguez-Menéndez, L. 2005. Los aprovechamientos forestales maderables en el Principado de Asturias (1972-2003). Proyecto Fin de Carrera. Escuela Universitaria de Ingenierías Técnicas de Mieres, Universidad de Oviedo.
- Rodríguez-Soalleiro, R. 1995. Crecimiento y Producción de masas forestales regulares de *Pinus pinaster* Ait. en Galicia. Alternativas selvícolas posibles. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- Rodríguez-Soalleiro, R.; Álvarez-González, J.G.; Cela-González, M.; Mansilla-Vázquez, P.; Vega-Alonso, P.; González-Rosales, M.; Ruíz-Zorrilla, P. y Vega-Alonso, P. 1997.

- Manual técnico de selvicultura del pino pinaster. Proxecto Columella. Escola Politécnica Superior de Lugo. Disponible en [Consultado, 20/05/2006]: <http://agrobyte.lugo.usc.es/agrobyte/publicaciones/pino/indice.html>.
- Rodríguez-Soalleiro, R.; Balboa, M.; Álvarez-González, J.G.; Merino, A. y Sánchez, F. 2004. Efecto de la selvicultura en la extracción de nutrientes de tres especies de crecimiento rápido del norte de España. Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales, Fuera de serie: 114-126.
- Rodríguez-Soalleiro, R. y Vega, P. 1998. Apuntes de selvicultura de zonas atlánticas. Escuela Politécnica Superior, Campus universitario de Lugo, Universidad de Santiago de Compostela. 148 pp.
- Roggy, J.C.; Prevost, M.F.; Garbaye, J. y Domenach, A.M. 1999. Nitrogen cycling in the tropical rain forest of French Guiana: comparison of two sites with contrasting soil types using $\delta^{15}\text{N}$. Journal of Tropical Ecology, 15: 1-22.
- Rojo, A.; Crecente, F.; Barrio, M.; Balboa, M.A. y Ferreiro-Abelairas, H. 2005. Instalación de un ensayo de claras para *Pinus radiata* D. Don en Galicia. IV Congreso Forestal Español. Zaragoza, 26-30 de septiembre de 2005. Libro de actas, mesa temática 3.
- Rojo, A.; Perales, X.; Sánchez, F.; Álvarez-González, J.G. y Gadow, K.v. 2005. Stem taper functions for maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) in Galicia (Northwestern Spain). European Journal of Forest Research, 124: 177-186.
- Romano, R.A. 2002. Estudio comparativo del diámetro de ramas en *Pinus radiata* D. Don con y sin mejoramiento genético. Trabajo Ing. For. Valdivia. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile. 82 pp.
- Romanyá, J. y Vallejo, R. 1996. Nutritional status and deficiency diagnosis of *Pinus radiata* plantations in Spain. Forest Science, 42: 1-6.
- Rose, C.E. y Lynch, T.B. 2001. Estimating parameters for tree basal area growth with a system of equations and seemingly unrelated regressions. Ecology and Management, 148: 51-61.
- Rothermel, R.C. 1972. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. USDA Forest Service. Intermountain Forest and Range Experiment Station Research Paper INT-115. 40 pp.
- Rothermel, R.C. 1991. Predicting behavior and size of crown fires in the Northern Rocky Mountains. USDA, Forest Service, Res. Pap. INT-438.
- Ruiz de la Torre, J. 2006. Flora Mayor. Ministerio de Medio Ambiente. Organismo Autónomo Parques Nacionales. Madrid. 1759 pp.
- Ruiz-González, A.; Vega, J.A. y Álvarez-González, J.G. 2009. Modelización de la variabilidad horaria de los contenidos de humedad en hojarasca de *Eucalyptus globulus*. Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales, 18(3): 247-263.
- Ruiz-González, A.D. y Álvarez-González, J.G. 2011. Canopy bulk density and canopy base height equations for assessing crown fire hazard in *Pinus radiata* plantations. Canadian Journal of Forest Research, 41: 839-850.
- Ruiz-Peinado, R.; Del Río, M.; Montero, G. 2011. New models for estimating the carbon sink capacity of Spanish softwood species. Forest System, 20(1): 176-188.
- Russell, G.; Jarvis, P.G. y Monteith, J.L. 1989. Absorption of radiation by canopies and stand growth. En: Russell, G.; Marshall, B. y Jarvis, P.G. (Eds.). Plant Canopies; Their Growth, Form and Function. Cambridge University Press, Cambridge. pp. 21-39.

- Russell, K. 1995. Sealing of pruning wounds and associated diseases, and prevention of disease by pruning. En: Hanley, D.P.; Oliver, C.D.; Maguire, D.A.; Briggs, D.G. y Fight, R.D. (Eds.). Forest pruning and wood quality of western North American conifers. Inst. For. Resour. College of Forest Resources, University of Washington, Seattle, Wash. Contrib., 77. pp. 238-244.
- Rustagi, R. y Loveless, R. 1991. Compatible variable-form volume and stem profile equations for Douglas-fir. Canadian Journal of Forest Research, 21: 143-151.
- Ryan, T.P. 1997. Modern regression methods. John Wiley & Sons, New York. 515 pp.

S

- Saavedra, C. 2005. Cuantificación y distribución de biomasa aérea en una plantación de 5 años de *Eucalyptus nitens* con alternativas nutricionales en un suelo rojo arcilloso. Tesis Ingeniero Forestal. Valdivia, Chile. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile. 62 pp.
- Saint-André, L.; M'Bou, A.T.; Mabiala, A.; Mouvondy, W.; Jourdan, C.; Roupsard, O.; Deleporte, P.; Hamel, O. y Nouvellon, Y. 2005. Age-related equations for above and below-ground biomass of a *Eucalyptus* hybrid in Congo. Forest Ecology and Management, 205: 199-214.
- Salas, J. e Infante, A. 2006. Producción Primaria Neta Aérea en algunos Ecosistemas y Estimaciones de Biomasa en Plantaciones Forestales. Revista Forestal Latinoamericana, 40: 47-70.
- Sánchez, F. 2001. Estudio de la calidad de estación, crecimiento, producción y selvicultura de *Pinus radiata* D. Don en Galicia. Tesis doctoral. Escuela Politécnica Superior de Lugo. Universidad de Santiago de Compostela.
- Sánchez, F.; Rodríguez-Soalleiro, R.; Rojo, A.; Álvarez-González, J.G.; López-Sánchez, C.A.; Gorgoso, J.J. y Castedo-Dorado, F. 2003. Crecimiento y tablas de producción de *Pinus radiata* D. Don en Galicia. Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales, 12(2): 65-83.
- Sánchez, F.; Ucha, P. y Rojo, A. 2004. Stem taper functions and volume equations with product classification for *Eucalyptus globulus* Labill. in Galicia (NW Spain). International IUFRO 4.04.06 Meeting. The Economics and Management of High Productivity Plantations. Lugo, 27-30 de septiembre 2004.
- Sánchez-Rodríguez, F. 2001. Crecimiento y producción de masas de *Pinus radiata* en Galicia. Tesis doctoral. Universidad de Santiago de Compostela. Escuela Politécnica Superior de Lugo.
- Sánchez-Rodríguez, F.; López, C.; Rodríguez-Soalleiro, R.; Español, E. y Merino, A. 2001. Influence of edaphic factor son the productivity of *Pinus radiata* D. Don plantations in NW Spain. Forest Ecology and Management, 171: 181-189.
- Sando, R.W. y Wick, C.H. 1972. A method of evaluating crown fuels in forest stands. USDA Forest Service. Research paper NC-84.
- Sanquetta, C.R.; Watzlawick, L.F. y Arce, J.E. 2002. Ecuaciones de biomasa aérea y subterránea en plantaciones de *Pinus taeda* en el sur del Estado de Paraná, Brasil. Patagonia forestal.
- Sans, C.; Daniluk, G.; Escudero, R.; Irisity, F.; Soria, L.; Priore, E.; Pelufo, M.; Arnaboldi, G. y Giosa, R. 2007. Determinación de parámetros y ecuaciones para estimar biomasa

- en plantaciones forestales. Proyecto MGAP/AECI Apoyo a la inserción de Uruguay en el Mecanismo de Desarrollo Limpio con Proyectos Forestales y Agropecuarios.
- Sanz, F.; Latour, S.; Neves, M.; Bastet, E.; Pischedda, D.; Piñeiro, G.; Gautier, T.; Lesbats, J.; Plantier, C.; Marques, A.; Lanvin, J.D.; Santos, J.A.; Touza, M.; Pedras, F.; Parrot, J.; Reuling, D. y Faria, C. 2006. Aplicaciones industriales de la madera de pino pinaster. Fundación para o Fomento da Calidade Industrial e o Desenvolvemento Tecnolóxico de Galicia (CIS Madeira). 247 pp.
- SAS Institute Inc. 2004a. SAS/ETS[®]. 9.1. User's Guide. SAS Institute Inc., Cary, NC.
- SAS Institute Inc. 2004b. SAS/STAT[®]. 9.1. User's Guide. SAS Institute Inc., Cary, NC.
- Satoo, T. y Madgwick, H.A.I. 1982. Forest Biomass. Forestry Sciences. Kluwer Academic Publishers Group, Holanda.
- Saur, E.; Ranger, J.; Lemoine, B. y Gelpe, J. 1992. Micronutrient distribution in 16-year-old maritime pine. *Tree Physiology*, 10: 307-316.
- Schlaegel, B.E. 1982. Acer negundo biomass component regression analysis for the Mississippi Delta. *Forest Science*, 28: 355-358.
- Schneider, R.; Berninger, F.; Ung, C-H.; Mäkela, A.; Swift, D.E.; Zhang, S.Y. y Whitehead, D. 2011. Within crown variation in the relationship between foliage biomass and sapwood area in jack pine. *Tree Physiology*, 31(1): 22-29.
- Schnute, J. 1981. A versatile growth model with statistically stable parameters. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 38: 1128-1140.
- Schoelzke, D. 2003. La poda en una plantación de *Pinus elliottii*. *Quebracho*, 10: 26-38.
- Schreuder, H.T. y Swank, W. T. 1974. Coniferous stands characterized with the Weibull distribution. *Canadian Journal of Forest Research*, 4: 518-523.
- Scott, J.H. 1999. NEXUS: A System for Assessing Crown Fire Hazard. *Fire Management Notes*, 59(2): 20-24.
- Scott, J.H. y Reinhardt, E.D. 2001. Assessing crown fire potential by linking models of surface and crown fire behavior. USDA Forest Service. Research Paper, RMRS-RP-29.
- Scott, J.H. y Reinhardt, E.D. 2007a. Effects of alternative treatments on canopy fuel characteristics in five conifer stands. En: Powers, R.F. (Ed.). *tech. Restoring fire-adapted ecosystems: proceedings of the 2005 national silviculture workshop*. Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-203, Albany, CA: Pacific Southwest Research Station, Forest Service, U.S. Department of Agriculture. pp. 193-209.
- Scott, J.H. y Reinhardt, E.D. 2007b. FireWords Version 1.0.2: Fire Science Glossary. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fire Sciences Laboratory (Producer).
- Seitz, R.A. 1995. Manual de poda de espécies arbóreas florestais. FUPF-Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná-Curitiba. 56 pp.
- Sendín, M.A. 1996. Asturias en el Segundo Inventario Forestal. *Ería*, 39-40: 131-150.
- Senelwa, K. y Sims, R.E.H. 1998. Tree biomass equations for short rotation Eucalyptus grown in New Zealand. *Biomass and Bioenergy*, 13(3): 133-140.
- Sharma, M. y Oderwald, R.G. 2001. Dimensionally compatible volume and taper equations. *Canadian Journal of Forest Research*, 31: 797-803.

- Sharma, M.; Oderwald, R.G. y Amateis, R.L. 2002. A consistent system of equations for tree and stand volume. *Forest Ecology and Management*, 165: 183-191.
- Sharma, M. y Parton, J. 2007. Height-diameter equations for boreal tree species in Ontario using a mixed-effects modeling approach. *Forest Ecology and Management*, 249: 187-198.
- Shelbourne, C.J.A.; Apiolaza, L.A.; Jayawickrama, K. y Sorensen, C. 1997. Developing breeding objectives for Radiata Pine in New Zealand. IUFRO Conference. Rotorua, New Zealand. pp. 160-168.
- Sierra de Grado, R.; Diez, R. y Alía, R. 1999. Evaluación de la rectitud del fuste en seis procedencias de *Pinus pinaster* Ait. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 8 (2): 263-278.
- Silcock, P. 2009. Some results from the Mangatu redwood sawing study. New Zealand Tree Grower. February, 2009. pp. 36-38. Disponible en [Consultado, 13/09/2012]: <http://www.nzffa.org.nz/farm-forestry-model/resource-centre/tree-grower-articles/tree-grower-february-2009/some-results-from-the-mangatu-redwood-sawing-study/>.
- Simioni, G.; Gignoux, J.; Le Roux, X.; Appé, R.; Benest, D. 2004. Spatial and temporal variations in leaf area index, specific leaf area and leaf nitrogen of two co-occurring savanna tree species. *Tree Physiology*, 24: 205-216.
- Sims, R.E.H.; Maiava, T.G. y Bullock, B. T. 2001. Short rotation coppice tree species selection for woody biomass production in New Zealand. *Biomass and Bioenergy*, 20(5): 329-335.
- Sims, R.E.H.; Senelwa, K.; Maiava, T. y Bullock, B.T. 1999a. *Eucalyptus* species for biomass energy in New Zealand - Part I: Growth screening trials at first harvest. *Biomass and Bioenergy*, 16(3): 199-205.
- Sims, R.E.H.; Senelwa, K.; Maiava, T. y Bullock, B.T. 1999b. *Eucalyptus* species for biomass energy in New Zealand - Part II: Coppice performance. *Biomass and Bioenergy*, 17(4): 333-343.
- Singh, V.; Newari, A.; Kushwaha, S.P.S. y Dadhwal, V.K. 2011. Formulating allometric equations for estimating biomass and carbon stock in small diameter trees. *Forest Ecology and Management*, 261(11): 1945-1949.
- Slijepcevic, A. 2001. Loss of carbon during controlled regeneration burns in *Eucalyptus obliqua* forest. *Tasforests*, 13(2): 281-290.
- Smethurst, P.; Baillie, C.; Cherry, M. y Holz, G. 2003. Fertilizer effects on LAI and growth of four *Eucalyptus nitens* plantations. *Forest Ecology and Management*, 176: 531-542.
- Smith, D.M.; Larson, B.C.; Kelty, M.J. y Ashton, P.M.S. 1997. The practice of silviculture. John Wiley & Sons, New York. 538 pp.
- Smith, R. 1992. The Myalup Wildfire, April 1991. Fire Protection Branch, Department of Conservation and Land Management, Western Australia.
- Snowdon, P.; Eamus, D.; Gibbons, P.; Khanna, P.K.; Keith, H.; Raison, R.J.; Kirschbaum, M.U.F. 2001. Synthesis of allometrics, review of root biomass, and design of future woody biomass sampling strategies. National Carbon Accounting System. Technical Report, 31, Australian Greenhouse Office, Canberra, 114 pp.
- Soares, P. y Tomé, M. 2003. GLOBTREE: an individual tree growth model for *Eucalyptus globulus* in Portugal. En: Amaro, A.; Reed, D. y Soares, P. (Eds.). *Modelling Forest Systems*. CAB International, Wallingford, UK. pp. 97-110.

- Soares, P.; Tomé, M.; Skovsgaard, J.P. y Vanclay, J.K. 1995. Evaluating a growth model for forest management using continuous forest inventory data. *Forest Ecology and Management*, 71(3): 251-265.
- Somerville, A. 1991. Pruned Stand Certification. *N.Z. Forestry*. August, 1991. pp. 27-28.
- Sotomayor, A.; Helmke, E. y García, E. 2002. Manejo y mantención de plantaciones forestales. *Pinus radiata* y *Eucalyptus* spp. Instituto Forestal (INFOR). Chile. Documento de Divulgación, 23. 51 pp.
- Stephens, S.L. 1998. Evaluation of the effects of silvicultural and fuels treatments on potential fire behavior in Sierra Nevada mixed conifer forests. *Forest Ecology and Management*, 105: 21-35.
- Sterba, H.; Blad, A. y Katzensteiner, K. 2002. Adapting an individual tree growth model for Norway spruce (*Picea abies* L. Karst.) in pure and mixed species stands. *Forest Ecology and Management*, 159: 101-110.
- Strauss, S.Y. y Agrawal, A.A. 1999. The ecology and evolution of plant tolerance to herbivory. *Trends in Ecology and Evolution*, 14: 179-185.
- Sutton, W.R.J. y Crowe, J.B. 1975. Selective pruning of radiate pine. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 5(2): 171-195.
- Systat Software Inc., 2006. SigmaPlot® 10.0. Software for Windows 2006. Systat Software, Inc. San Jose, CA.

T

- Tasissa, G. y Burkhart, H.E. 1998. An Application of mixed effects analysis to modeling thinning effects on stem profile of loblolly pine. *Forest Ecology and Management*, 103: 87-101.
- Tavira, S.C. 1997. Efectos dasométricos a corto plazo de una clara sobre masa de *Pinus sylvestris* L. en parcelas de repoblaciones en Sierra Nevada. II Congreso Forestal Español. Tomo 2CFE04-031-T4: 185-190.
- Temesgen, H.; Strunk, J. y Andersen, H.E. 2010. Challenges and opportunities in estimating biomass change using successive remotely sensed and ground data in Coastal Alaska Forests. Presented at the 23rd IUFRO World Congress, August 27, Seoul, Korea.
- Ter-Mikaelian, M.T. y Korzukhin, M.D. 1997. Biomass equations for sixty-five North American tree species. *Forest Ecology and Management*, 97: 1-24.
- Ter-Mikaelian, M.T. y Parker, W.C. 2000. Estimating biomass of White spruce seedlings with vertical Photo imagery. *New Forests*, 20: 145-162.
- Thakur, T. y Singh, L. 2005. Growth and above ground biomass in short rotation *Eucalyptus tereticornis* Sm. provenances. *Plant Archives*, 5 (2): 441-445.
- Thomas, C. y Parresol, B. 1991. Simple, flexible, trigonometric taper equations. *Canadian Journal of Forest Research*, 21: 1132-1137.
- Todoroki, C.L.; Monserud, R.A. y Parry, D.L. 2005. Predicting internal lumber grade from log surface knots: Actual and simulated results. *Forest products journal*, 55(6): 38-47.
- Todoroki, C.L.; West, G.G. y Knowles, R.L. 2001. Sensitivity analysis of log and branch characteristics influencing sawn timber grade. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 31: 101-119.

- Tombleson, J.D.; Grace, J.C. e Inglis, C.S. 1991. Response of radiata pine branch characteristics to site and stocking. En: James, R.N. y Tarlton, G.L. (Eds.). New approaches to spacing and thinning in plantation forestry. New Zealand Forest Research Institute Bulletin, 151: 229-231.
- Tombleson, J.D. e Inglis, C.S. 1986. Comparison of radiata pine shelterbelts and plantations. En: Maclaren, P. (Ed.). Proceedings of the agroforestry symposium. Rotorua, New Zealand. 24-27 November. Ministry of Forestry, Forest Research Institute, FRI Bulletin, 139: 261-276.
- Tomé, M. 1988. Modelação do crescimento da árvore individual em povoamentos de *Eucalyptus globulus* Labill. (1ª rotação) na região centro de Portugal. Ph. D. Thesis, Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, 256 pp. (Inédito).
- Torrubiano, C.R. 1994. Funciones de ahusamiento para *Pinus radiata*. Tesis Mg. Ciencias. Universidad Austral de Chile. 96 pp + anexos.
- Trasobares, A.; Pukkala, T. y Miina, J. 2004a. Growth and yield model for uneven-aged mixtures of *Pinus sylvestris* L. and *Pinus nigra* Arn. in Catalonia, north-east Spain. Annals of Forest Science, 61(1): 9-24.
- Trasobares, A.; Tomé, M. y Miina, J. 2004b. Growth and yield model for *Pinus halepensis* Mill. in Catalonia, north-east Spain. Forest Ecology and Management, 203(1-3): 49-62.
- Trincado, G. 2006. Dynamic modeling of branches and knot formation in loblolly pine (*Pinus taeda* L.) trees. PhD Thesis. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.
- Turner, P. y Price, C.S. 1996. Maximizing value of the plantation resource Part 1 - Development of a Log Grading Proposal for Pruned Softwood Logs. South African Forestry Journal, 176(1): 29-33.

V

- Valdés, C.M.; Díaz-Fernández, P. y Gil, L. 2003. La transformación histórica del paisaje forestal en Asturias. Introducción al Tercer Inventario Forestal Nacional 1997-2006: Principado de Asturias. Dirección General de Conservación de la Naturaleza, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid. 139 pp. Disponible en [Consultado, 17/04/2012]: http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/Asturias_P_tcm7-167160.pdf.
- Valdivieso, J.A. 1990. Un método alternativo de manejo para plantaciones: espaciamiento concentrado en árboles selectos. Bosque, 11(2): 3-8.
- Valentine, H.T.; Tritton, L.M. y Furnival, G.M. 1984. Subsampling trees for biomass, volume, or mineral content. Forest Science, 30: 673-681.
- Valinger, E. 1992. Effects of thinning and nitrogen fertilisation on stem growth and stem form of *Pinus sylvestris* trees. Scandinavian Journal of Forest Research, 7: 219-228.
- Van Keulen, H.; Van Laar, H.H. y Rabbinge, R. 2008. 40 years Theory and Model at Wageningen UR. Wageningen University and Research Centre. 57 pp. ISBN 9085853486 y 9789085853480.
- Van Laar, A. y Akça, A. 1997. Forest Mensuration. Cuvillier Verlag, Göttingen, 418 pp.
- Van Wagner, C.E. 1977. Conditions for the start and spread of crown fire. Canadian Journal of Forest Research, 7: 24-34.

- Vanclay, J.K. 1991. Mortality functions for north Queensland rainforest. *Journal of Tropical Forest Science*, 4: 15-36.
- Vanclay, J.K. 1994. Modelling forest growth and yield. Applications to mixed tropical forests. CAB International, Wallingford. 312 pp.
- Vanclay, J.K. y Skovsgaard, J.P. 1997. Evaluating forest growth models. *Ecological Modelling*, 98: 1-12.
- Vega, J.A.; Bará, S.; Alonso, M.; Fonturbel, M.T. y García, P. 1987. Preliminary results of a study on short term effects of prescribed fire in pine stands in N.W. Spain. *Ecología Mediterránea*, XII(4): 177-188.
- Vega, J.A.; Fernández, C.; Pérez-Gorostiaga, P. y Fonturbel, T. 2008. The influence of fire severity, serotiny, and post-fire management on *Pinus pinaster* Ait. recruitment in three burnt areas in Galicia (NW Spain). *Forest Ecology and Management*, 256: 1596-1603.
- Velazquez-Martínez, A.; Perry, D.A. y Bell, T.E. 1992. Response of aboveground biomass increment, growth efficiency, and foliar nutrients to thinning, fertilization, and pruning in young Douglas-fir plantations in the central Oregon Cascades. *Canadian Journal of Forest Research*, 22: 1278-1289.
- Verwijst, T. y Telenius, B. 1999. Biomass estimation in short rotation forestry. *Forest Ecology and Management*, 121: 137-146.
- Vidal, R.; Rodríguez, J.; Benítez, J.Y.; Álvarez, R.C. y Gra, H. 2002. Estimación de la biomasa de copa para árboles en pie de *Pinus tropicalis* Morelet en la empresa forestal integral Macurije de la provincia de Pinar del río, Cuba. *Revista Floresta*, 32(2): 261-265.
- Vignote, S y Jiménez, F. 2000. Tecnología de la madera. 2º Ed. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Mundi-Prensa. Madrid. 653 pp.
- Vignote, S. y Martínez, I. 2006. Tecnología de la madera. Ed. Mundi-Prensa. Madrid. 685 pp.
- Vignote, S.; Picos, J. y Zamora, R. 2000. Características de las principales maderas utilizadas en Bizkaia. Tecnología y aplicaciones. Departamento de Agricultura de la Diputación Foral de Bizkaia. Bizkaia. 292 pp.
- Villalobos, L.P. 2005. Evaluación del efecto combinado de altura inicio y frecuencia de podas sobre la magnitud del DOS, en un ensayo de *Pinus radiata* D. Don., ubicado en la VIII Región. Trabajo Ing. For. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile, Valdivia. 53 pp.
- Viquez, E. y Pérez, D. 2005. Effect of pruning on tree growth, yield, and wood properties of *Tectona grandis* plantations in Costa Rica. *Silva Fennica*, 39(3): 381-390.
- Vos, J.; Marcelis, L.F.M.; De Visser, P.H.B.; Struik, P.C. y Evers, J.B. (Eds.). 2007. Functional-Structural Plant Modelling in Crop Production. Springer, Dordrecht. 268 pp.
- Vose, J.M. 1988. Patterns of leaf area distribution within crowns of nitrogen-and-phosphorus-fertilized loblolly pine tree. *Forest Science*, 34: 564-573.

W

- Waghorn, M.J.; Watt, M.S. y Mason, E.G. 2007. Influence of tree morphology, genetics, and initial stand density on outerwood modulus of elasticity of 17-year old *Pinus radiata*. *Forest Ecology and Management*, 244: 86-92.

- Wang, C. 2006. Biomass allometric equations for 10 co-occurring tree species in Chinese temperate forests. *Forest Ecology and Management*, 1-3: 9-16.
- Wang, J.; Zhang, C.; Xia, F.; Zhao X.; Wu, L. y Gadow, K.v. 2011. Biomass structure and allometry of *Abies nephrolepis* (Maxim) in Northeast China. *Silva Fennica*, 45(2): 211-226.
- Wardlaw, T.J. y Neilsen, W.A. 1999. Decay and other defects associated with pruned branches of *Eucalyptus nitens*. *Tasforests*, 11: 49-57.
- Waring, K.M. y O'Hara, K.L. 2005. Ten-year growth and epicormic sprouting response of western larch to pruning in western Montana. *Western Journal of Applied Forestry*, 20: 228-232.
- Waring R.H. y Schlesinger, W.H. 1985. *Forest ecosystems: Concepts and management*. Academic Press Inc. Orlando. 340 pp.
- Weatherspoon, C. 1996. Fire-silviculture relationships in Sierra forests. En: *Sierra Nevada Ecosystem Project: Final report to Congress, 2, Assessments and scientific basis for management options*. Davis: University of California, Centers for Water and Wildland Resources. pp. 1167-1176.
- Weatherspoon, C.P. y Skinner, C.N. 1995. An assessment of factors associated with damage to tree crowns from the 1987 wildfires in northern California. *Forest Science*, 41:430-51.
- West, P.W. 1981. Simulation of diameter growth and mortality in regrowth eucalypt forest of Southern Tasmania. *Forest Science*, 27(3): 603-616.
- West, P.W.; Ratkowsky, D.A. y Davis, A.W. 1984. Problems of hypothesis testing of regressions with multiple measurements from individual sampling units. *Forest Ecology and Management*, 7: 207-224.
- White, H. 1980. A Heteroskedasticity-Consistent Covariance Matrix Estimator and a Direct Test for Heteroskedasticity. *Econometrica*, 48 (4): 817-838.
- Whiteside, I.D. 1982. Predicting radiata pine gross sawlog values and timber grades from log parameters. *FRI Bulletin*, 4.
- Williams, D.F. 1978. Fuel properties before and after thinning in young radiata pine plantations. *Fire Management and Environment. Research Report*, 3.
- Wiseman, D.; Smethurst, P.; Pinkard, L.; Wardlawd, T.; Beadle, C.; Hall, M.; Baillie, C. y Mohammed, C. 2006. Pruning and fertiliser effects on branch size and decay in two *Eucalyptus nitens* plantations. *Forest Ecology and Management*, 225: 123-133.
- Wu, H.X.; Eldridge, K.G.; Matheson, A.C.; Powell, M.B.; McRae, T.A.; Butcher, T.B. y Johnson, I.G. 2007. Achievements in forest tree improvement in Australia and New Zealand 8. Successful introduction and breeding of radiata pine in Australia. *Australian Forestry*, 70(4): 215-225.
- Wu, H.X.; Ivković, M.; Gapare, W.J.; Matheson, A.C.; Baltunis, B.S.; Powell, M.B. y McRae, T.A. 2007. Breeding for Wood Quality and Profit in Radiata Pine: A Review of Genetic Parameters. *Proceedings: The Australasian Forest Genetics Conference*. Hobart. pp. 11-14.
- Wykoff, W.R. 1990. A basal area increment model for individual conifers in the northern rocky mountains. *Forest Science*, 36: 1077-1104.

Wykoff, W.R.; Crookston, N.L. y Stage, A.R. 1982. User's guide to the Stand Prognosis Model. USDA For. Serv., Gen. Tech. Rep. INT-133, 112 pp.

X

Xanthopoulos, G. 1990. Development of a wildland crown fire initiation model. Ph.D. dissertation. Univ. Montana, Missoula, MT.

Xu, M. y Harrington, T.B. 1998. Foliage biomass distribution of loblolly pine as affected by tree dominance, crown size, and stand characteristics. *Canadian Journal of Forest Research*, 28: 887-892.

Xu, P. 2002. Estimating the influence of knots on the local longitudinal stiffness in radiata pine structural timber. *Wood Science and Technology*, 36(6): 501-509.

Xunta Galicia. 2008. Plano de continxencia para a erradicación de *Fusarium circinatum* Nirenberg y O'Donnel (*Gibberella circinata*) en Galicia. Disponible en [Consultado, 10/08/2009]:
http://mediorural.xunta.es/areas/agricultura/sanidade_vexetal/rexistro_fitosanitarios/.

Y

Yang, X.; Witcosky, J.J. y Miller, J.J. 1999. Vertical overstory canopy architecture of temperate deciduous hardwood forests in the Eastern United States. *Forest Science*, 45(3): 349-358.

Yang, Y.; Huang, S.; Trincado, G. y Meng, S.X. 2009. Nonlinear mixed-effects modeling of variable-exponent taper equations for lodgepole pine in Alberta, Canada. *European Journal of Forest Research*, 128: 415-429.

Z

Zas, R.; Español, E.; Alonso, M. y Vega, G. 2000. Nutritional status of young *Pinus radiata* plantations in northwest Spain. En: *Proceedings of the International Symposium on Managing Forest Soils for Sustainable Productivity*. Vila Real, Portugal, September 2000. pp. 51.

Zas, R.; Merlo, E. y Fernández-López, J. 2004. Genetic parameter estimates for maritime pine in the atlantic coast of north-west Spain. *Forest Genetics*, 11(1): 45-53.

Zas, R. y Serrada, R. 2003. Foliar nutrient status and nutritional relationships of young *Pinus radiata* D. Don plantations in northwest Spain. *Forest Ecology and Management*, 174: 167-176.

Zavitskovski, J.; Jeffers, R.M.; Nienstaedt, H. y Strong, T.F. 1981. Biomass production of several jack pine provenances at three Lake States locations. *Canadian Journal of Forest Research*, 11: 441-447.

Zeide, B. 1993. Analysis of growth equations. *Forest Science*, 39(3): 594-616.

Zellner, A. 1962. An efficient method of estimating seemingly unrelated regressions and test for aggregation bias. *Journal of the American Statistical Association*, 57(298): 348-368.

Zeng, B. 2001. Pruning Chinese Trees - An Experimental and Modelling Approach. Doctoral Thesis. Universiteit Utrecht.

- Zhang, Y.; Borders, B.E.; Will, R.E. y De Los Santos-Posadas, H.M. 2004. A model for foliage and branch biomass prediction for intensively managed fast growing loblolly pine. *Forest Science*, 50(1): 65-80.
- Zhao, D.; Borders, B. y Wilson, M. 2004. Individual-tree diameter growth and mortality models for bottomland mixed-species hardwood stands in the lower Mississippi alluvial valley. *Forest Ecology and Management*, 199: 307-322.
- Zhao, D.; Borders, B.; Wilson, M. y Rathbun, S.L. 2006. Modeling neighborhood effects on the growth and survival of individual trees in a natural temperate species-rich forest. *Ecological Modelling*, 196: 90-102.
- Zianis, D. y Mencuccini, M. 2004. On simplifying allometric analyses of forest biomass. *Forest Ecology and Management*, 187: 311-332.
- Zimmerman, D.L. y Núñez-Antón, V. 2001. Parametric modelling of growth curve data: An overview (with discussion). *Test*, 10: 1-73.

Referencia legislativa

- Resolución 20/10/2008, de la Dirección General de Explotaciones Agrarias y Calidad Alimentaria de la Junta de Extremadura, DOE 234, de 3/12/2008.
- Resolución 17/11/2010, de la Dirección General de Producción Agropecuaria de la Xunta de Galicia, DOGA 228, de 26/11/2010.
- Resolución 17/02/2012, de la Dirección General de Agricultura y Ganadería, DOE 46, de 07/03/2012.

Decisiones Comunitarias

- Decisión 2006/133/CE de la Comisión, de 13 de febrero de 2006, relativa a las medidas complementarias que se exige adoptar a los Estados miembros contra la propagación de *Bursaphelenchus xylophilus* (Steiner et Buhrer) Nickle et al. (el nematodo de la madera del pino), en lo que respecta a zonas de Portugal distintas de aquéllas en las que se haya comprobado su ausencia.

Directivas

- DIRECTIVA 2000/29/CE DEL CONSEJO, de 8 de mayo de 2000, relativa a las medidas de protección contra la introducción en la Comunidad de organismos nocivos para los vegetales o productos vegetales y contra su propagación en el interior de la Comunidad. Diario Oficial de las Comunidades Europeas (DO), 10.7.2000, L 169, p.1.
- DIRECTIVA 77/93/CEE DEL CONSEJO, de 21 de diciembre de 1976, relativa a las medidas de protección contra la introducción en la Comunidad de Organismos nocivos para los vegetales o productos vegetales y contra su propagación en la Comunidad.

Reales Decretos

- REAL DECRETO 637/2006, de 26 de mayo, por el que se establece el programa nacional de erradicación y control del hongo *Fusarium Circinatum* Nirenberg et O'donnell. Boletín Oficial del Estado (BOE), 9 junio 2006, núm. 137.

Normativa

UNE 56544:2011. Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas.

Páginas web

http://aym.juntaex.es/sectores/agricultura/sanidad_vegetal_introduc/nematodo/ficha.htm
[Consultado, 20/08/2010].

<http://leu.irnase.csic.es/mimam/atlas.htm> [Consultado, 28/07/2009].

<http://www.eurosilvasur.net/espanol/atlas.htm> [Consultado, 28/07/2009].

http://www.mma.es/portal/secciones/biodiversidad/montes_politica_forestal/recursos_geneticos_forestal/programas_mejora_genetica/delimitacion_regiones_procedencia/
[Consultado, 28/07/2009].

<http://www.pierroton.inra.fr/IEFC/> [Consultado, 28/07/2009].

http://aym.juntaex.es/sectores/agricultura/sanidad_vegetal_introduc/nematodo/
[Consultado, 18/04/2012].

Videos

Radiata pine growers manual-vídeo. [Consultado, 10/06/2006].



ANEXO

ANEXO

En el presente anexo se recogen las fichas descriptivas de los rodales de *Pinus radiata* D. Don y *Pinus pinaster* Aiton en los que ha sido establecida la red experimental de parcelas empleada para el desarrollo de la presente tesis doctoral. La metodología de estimación de las diferentes variables descritas en las fichas se encuentra recogida en el capítulo 2 de este trabajo.

La Campa

Localización Geográfica

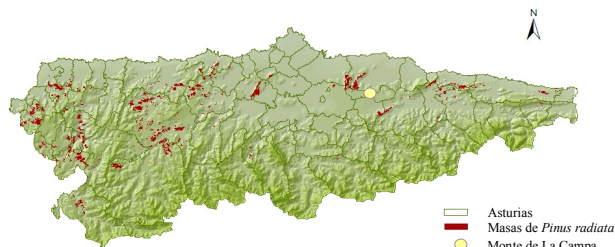
Provincia: Asturias
Concejo: Villaviciosa
Monte: La Campa

Coordenadas UTM (Huso 30)

Sistema de referencia ED1950

X: 300.125,90 m

Y: 4.771.297,07 m



Características y tipología de la masa

Especie principal: *Pinus radiata* D. Don.

Origen: Plantación

Tipología: masa homogénea, coetánea, uniforme, monoespecífica, monoestratificada, en estado de monte bravo-latizal bajo

Características del sitio de ensayo

Edad: 9 años
Superficie: 11.249,55 m²
IS: 22,4 m

Características Fisiográficas

Altitud (m):		Pendiente (%):	
Promedio	528,94	Promedio	22,37
Mínimo	505,82	Mínimo	6,30
Máximo	544,63	Máximo	40,17

Orientación: Este

Características Edafológicas

Textura: Franco-arcillosa
pH: 5,08

Características Climatológicas



Momento inicial de instalación

Parámetro climático	Mes												Total Año
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
<i>P</i> (mm)	229	154	174	186	153	150	80	124	215	215	239	246	2.164
<i>T</i> (°C)	5	6	8	9	12	15	17	17	16	12	8	6	11
<i>ETP</i> (mm)	12	14	32	32	76	103	119	98	74	44	21	29	655

Cabada

Localización Geográfica

Provincia: Asturias

Concejo: Tineo

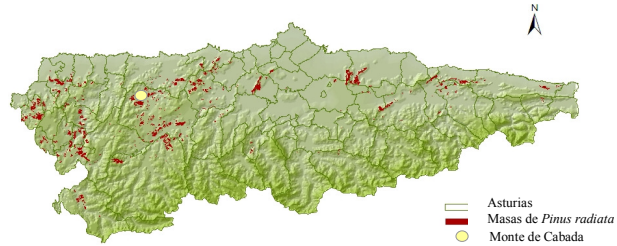
Monte: Cabada

Coordenadas UTM (Huso 29)

Sistema de referencia ED1950

X: 698.115,08 m

Y: 4.810.635,62 m



Características y tipología de la masa

Especie principal: *Pinus radiata* D. Don.

Origen: Plantación

Tipología: masa homogénea, coetánea, uniforme, monoespecífica, monoestratificada, en estado de monte bravo-latizal bajo

Características del sitio de ensayo

Edad: 7 años

Superficie: 12.588,05 m²

IS: 25,5 m

Características Fisiográficas

Altitud (m):		Pendiente (%):	
Promedio	547,84	Promedio	28,03
Mínimo	505,17	Mínimo	18,49
Máximo	582,46	Máximo	41,24
Orientación: Sur			

Características Edafológicas

Textura: Franco-arenoso

pH: 3,67

Características Climatológicas



Momento inicial de instalación

Parámetro climático	Mes												Total Año
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
P (mm)	241	163	147	133	77	95	10	69	6	149	197	302	1.590
T (°C)	5	5	9	10	12	16	17	18	16	11	8	5	11
ETP (mm)	16	16	39	46	69	46	106	101	79	49	30	17	614

Santa Catalina

Localización Geográfica

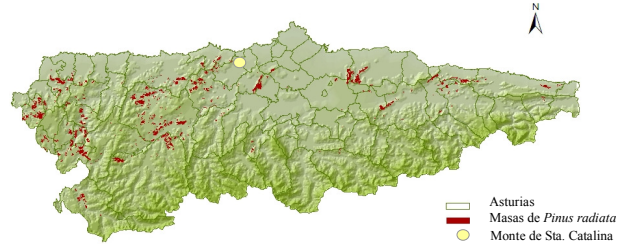
Provincia: Asturias
Concejo: Pravia
Monte: Santa Catalina

Coordenadas UTM (Huso 29)

Sistema de referencia ED1950

X: 733.633,73 m

Y: 4.822.476,74 m



Características y tipología de la masa

Especie principal: *Pinus radiata* D. Don.

Origen: Plantación

Tipología: masa homogénea, coetánea, uniforme, monoespecífica, monoestratificada, en estado de monte bravo-latizal bajo

Características del sitio de ensayo

Edad: 8 años
Superficie: 6.737,83 m²
IS: 23,2 m

Características Fisiográficas

Altitud (m):		Pendiente (%):	
Promedio	324,20	Promedio	24,84
Mínimo	305,08	Mínimo	6,91
Máximo	345,92	Máximo	35,16

Orientación: Este-Noreste

Características Edafológicas

Textura: Franco-arcillo-arenoso
pH: 4,07

Características Climatológicas



Momento inicial de instalación

Parámetro climático	Mes												Total Año
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
<i>P</i> (mm)	116	111	101	135	107	63	55	67	96	131	145	147	1.274
<i>T</i> (°C)	9	9	11	11	14	16	18	19	17	14	12	10	13
<i>ETP</i> (mm)	19	24	44	54	68	96	125	111	89	55	28	19	731

Fabal

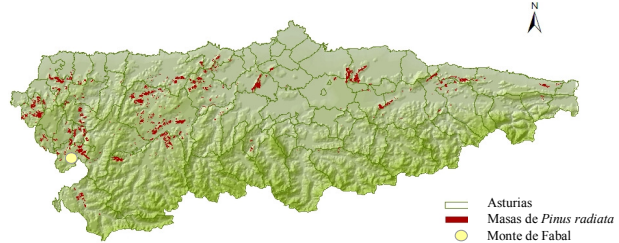
Localización Geográfica

Provincia: Asturias
Concejo: Grandas de Salime
Monte: Fabal

Coordenadas UTM (Huso 29)

Sistema de referencia ED1950

X: 671.575,29 m
Y: 4.785.526,12 m



Características y tipología de la masa

Especie principal: *Pinus radiata* D. Don.

Origen: Plantación

Tipología: masa homogénea, coetánea, uniforme, monoespecífica, monoestratificada, en estado de monte bravo-latizal bajo

Características del sitio de ensayo

Edad: 10 años
Superficie: 11.312,08 m²
IS: 23,5 m

Características Fisiográficas

Altitud (m):		Pendiente (%):	
Promedio	591,44	Promedio	34,13
Mínimo	539,50	Mínimo	13,71
Máximo	630,56	Máximo	30,39

Orientación: Sur-Sureste

Características Edafológicas

Textura: Franco-arcillo-arenoso
pH: 4,49

Características Climatológicas



Momento inicial de instalación

Parámetro climático	Mes												Total Año
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
<i>P</i> (mm)	142	128	108	114	110	68	63	49	74	120	142	153	1.272
<i>T</i> (°C)	6	7	10	9	14	16	18	18	15	13	16	14	13
<i>ETP</i> (mm)	18	18	32	41	62	85	103	92	73	53	29	20	626

Valsera

Localización Geográfica

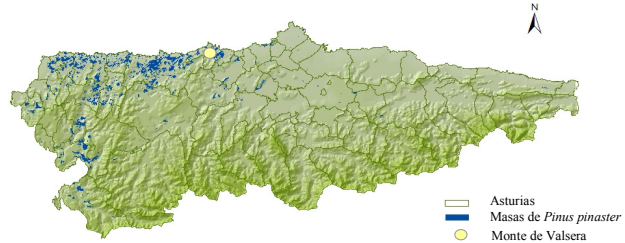
Provincia: Asturias
Concejo: Cudillero
Monte: Valsera

Coordenadas UTM (Huso 29)

Sistema de referencia ED1950

X: 725.018,66 m

Y: 4.826.681,90 m



Características y tipología de la masa

Especie principal: *Pinus pinaster* Aiton subesp. atlántica

Origen: Regeneración natural

Tipología: masa homogénea, regular, uniforme, monoespecífica, monoestratificada, en estado de monte bravo-latizal bajo

Características del sitio de ensayo

Edad: 8 años

Superficie: 10.163 m²

IS: 16,0 m

Características Fisiográficas

Altitud (m):		Pendiente (%):	
Promedio	101,03	Promedio	14,64
Mínimo	86,09	Mínimo	10,72
Máximo	111,93	Máximo	19,27

Orientación: Oeste-Noroeste

Características Edafológicas

Textura: Franco-Arcillo-Arenosa

pH: 4,20



Momento inicial de instalación

Características Climatológicas

Parámetro climático	Mes												Total Año
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
P (mm)	94	82	66	82	85	53	39	38	64	109	76	142	930
T (°C)	7	8	12	14	17	20	21	21	21	15	9	7	14
ETP (mm)	27	27	39	49	71	88	106	101	81	58	34	25	681

Barcia

Localización Geográfica

Provincia: Asturias

Concejo: Valdés

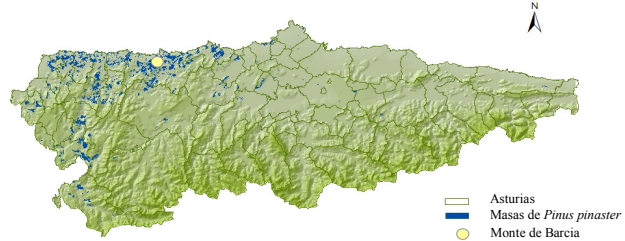
Monte: Barcia

Coordenadas UTM (Huso 29)

Sistema de referencia ED1950

X: 703.747,84 m

Y: 4.821.605,10 m



Características y tipología de la masa

Especie principal: *Pinus pinaster* Aiton subesp. atlántica

Origen: Plantación

Tipología: masa homogénea, coetánea, uniforme, monoespecífica, monoestratificada, en estado de monte bravo-latizal bajo

Características del sitio de ensayo

Edad: 11 años

Superficie: 10.838 m²

IS: 12,3 m

Características Fisiográficas

Altitud (m):		Pendiente (%):	
Promedio	382,40	Promedio	37,80
Mínimo	344,05	Mínimo	22,00
Máximo	434,54	Máximo	54,50
Orientación: Noreste			

Características Edafológicas

Textura: Franco-Arcillo-Arenosa

pH: 3,46



Características Climatológicas

Momento inicial de instalación

Parámetro climático	Mes												Total Año
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
P (mm)	200	150	133	127	88	87	27	67	38	138	173	249	1.475
T (°C)	6	6	9	10	13	16	17	18	16	13	9	7	12
ETP (mm)	20	20	40	47	69	60	105	100	79	52	32	20	644

Monteagudo

Localización Geográfica

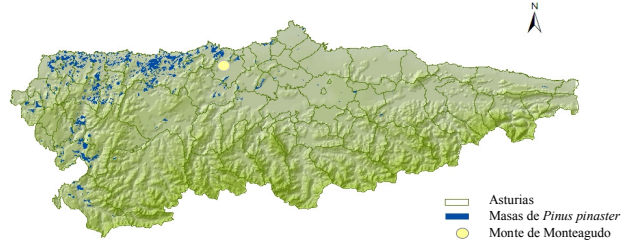
Provincia: Asturias
Concejo: Pravia
Monte: Monteagudo

Coordenadas UTM (Huso 29)

Sistema de referencia ED1950

X: 734.056,38 m

Y: 4.823.291,07 m



Características y tipología de la masa

Especie principal: *Pinus pinaster* Aiton subesp. atlántica

Origen: Regeneración natural

Tipología: masa homogénea, regular, uniforme, monoespecífica, monoestratificada, en estado de monte bravo-latizal bajo

Características del sitio de ensayo

Edad: 8 años
Superficie: 8.945 m²
IS: 12,6 m

Características Fisiográficas

Altitud (m):		Pendiente (%):	
Promedio	247,67	Promedio	28,40
Mínimo	222,77	Mínimo	13,11
Máximo	265,00	Máximo	44,56

Orientación: Suroeste

Características Edafológicas

Textura: Franco-Arcillo-Arenosa
pH: 3,75



Momento inicial de instalación

Características Climatológicas

Parámetro climático	Mes												Total Año
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
<i>P</i> (mm)	108	101	89	117	99	59	50	57	85	124	122	145	1.156
<i>T</i> (°C)	8	9	11	12	15	17	19	20	18	15	11	9	14
<i>ETP</i> (mm)	22	25	42	52	68	93	119	107	86	56	30	21	721

Uría

Localización Geográfica

Provincia: Asturias

Concejo: Ibias

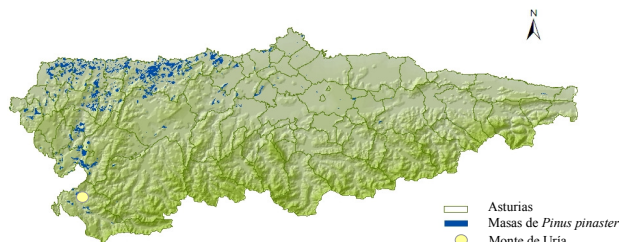
Monte: Uría

Coordenadas UTM (Huso 29)

Sistema de referencia ED1950

X: 673.910,52 m

Y: 4.771.297,07 m



Características y tipología de la masa

Especie principal: *Pinus pinaster* Aiton

Origen: Regeneración natural

Tipología: masa homogénea, regular, uniforme, monoespecífica, monoestratificada, en estado de monte bravo-latizal bajo

Características del sitio de ensayo

Edad: 7 años

Superficie: 9.093 m²

IS: 15,5 m

Características Fisiográficas

Altitud (m):		Pendiente (%):	
Promedio	535,84	Promedio	21,60
Mínimo	518,18	Mínimo	14,49
Máximo	551,40	Máximo	34,88

Orientación: Suroeste-Noroeste

Características Edafológicas

Textura: Franco-Arcillo-Arenosa

pH: 4,40



Características Climatológicas

Momento inicial de instalación

Parámetro climático	Mes												Total Año
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
<i>P</i> (mm)	138	124	104	105	106	66	58	50	72	116	138	149	1.226
<i>T</i> (°C)	7	7	10	9	14	17	18	19	16	13	16	14	13
<i>ETP</i> (mm)	18	18	32	41	62	85	103	92	73	53	29	20	626

Loris

Localización Geográfica

Provincia: Asturias

Concejo: Salas

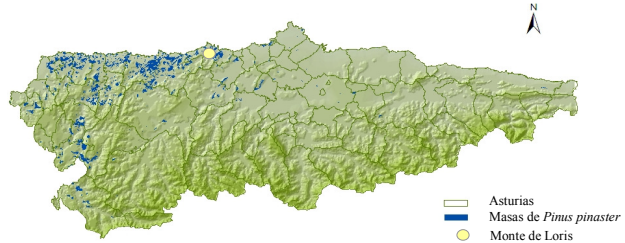
Monte: Loris

Coordenadas UTM (Huso 29)

Sistema de referencia ED1950

X: 726.102,69 m

Y: 4.811.439,88 m



Características y tipología de la masa

Especie principal: *Pinus pinaster* Aiton subesp. atlántica

Origen: Regeneración natural

Tipología: masa homogénea, regular, uniforme, monoespecífica, monoestratificada, en estado de monte bravo-latizal bajo

Características del sitio de ensayo

Edad: 10 años

Superficie: 400 m²

IS: 24,3 m

Características Fisiográficas

Altitud (m):		Pendiente (%):	
Promedio	295,63	Promedio	31,20
Mínimo	292,55	Mínimo	9,30
Máximo	304,37	Máximo	46,60
Orientación: Oeste			

Características Edafológicas

Textura: Franco-Arenoso

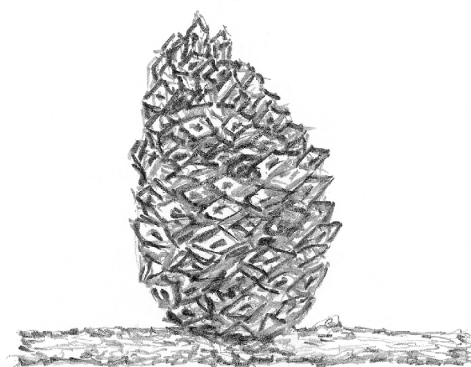
pH: 4,33

Características Climatológicas



Momento inicial de instalación

Parámetro climático	Mes												Total Año
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
P (mm)	114	108	97	130	104	62	54	64	92	129	138	147	1.237
T (°C)	9	9	11	11	15	17	18	19	18	14	12	9	13
ETP (mm)	20	24	43	53	82	95	123	110	88	55	28	19	742





DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGROFORESTAL